

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

DETEKCE PATOLOGIÍ VE SNÍMCÍCH SÍTNICE

DETECTION OF PATHOLOGIES IN RETINAL IMAGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kludia Mesíková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Vičar

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Biomedicínská technika a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

Studentka: Klaudia Mesíková

ID: 203389

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Detekce patologií ve snímcích sítnice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Prostřednictvím odborné literatury se seznámte s metodami zpracování obrazu a patologiemi nacházejícími se v obrazu sítnice. 2) Proveďte literární rešerši se zaměřením na plně automatickou detekci patologií. 3) Vybranou metodu blíže nastudujte a proveďte její implementaci ve zvoleném programovém prostředí. 4) Implementované algoritmy následně otestujte a vhodně vyhodnoťte na dostupných obrazových datech. 5) Proveďte diskusi dosažených výsledků a zhodnoťte účinnost a využitelnost aplikovaného řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SONKA, Milan. Image processing, analysis, and machine vision. 3rd ed. Toronto: Thompson Learning, c2008. ISBN 978-0495082521.

[2] JELINEK, Herbert a Michael J. CREE. Automated Image Detection of Retinal Pathology. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN Automated Image Detection of Retinal Pathology.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 5.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Vičar

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cieľom bakalárskej práce je návrh a implementácia softwaru na detekciu prejavov ochorenia diabetes mellitus na snímke sietnice ľudského oka. Ochorenie s názvom diabetická retinopatia je najčastejším ochorením postihujúcim sietnicu. Patológie s ňou spojené môžu často viesť k čiastočnej až úplnej slepote. Pre detekciu patologických prejavov je dôležité správne detekovať niektoré časti sietnice ako je optický disk a krvné cievy. Tie predstavujú problém pri detekcii patológií. Po odstránení optického disku a ciev sa detekuje hľadaný patologický útvar.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

ľudské oko, sietnica oka, diabetes mellitus, diabetická retinopatia, spracovanie obrazu, Matlab

ABSTRACT

The goal of this thesis is to design and implement software for the detection of diabetes mellitus symptoms from the image of the human eye retina. Diabetic retinopathy is the most common disease affecting the retina. Pathologies connected with this disease can lead to partial or complete blindness. For the detection of pathological symptoms is important to correctly detect some parts of the eye retina such as optic disc and blood vessels. These can cause a problem with the identification of disease. After removing the optic disc and blood vessels, the pathology object is being detected.

KEYWORDS

human eye, eye retina, diabetes mellitus, diabetic retinopathy, image processing, Matlab

MESÍKOVÁ, Klaudia. *Detekcia patológií v snímkach sietnice*. Brno, 2020, 62 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedúci práce: Ing. Tomáš Vičar

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Detekcia patológií v snímkach sietnice“ som vypracovala samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autora uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušila autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahla nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomá následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autorky

POĎAKOVANIE

Rada by som poďakovala vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Tomášovi Vičarovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	10
1 Oko	11
1.1 Anatómia oka	11
1.1.1 Stena očnej gule	12
1.1.2 Obsah očnej gule	13
2 Sietnica	15
2.1 Optická časť sietnice	15
2.2 Mikroskopická stavba sietnice	16
2.2.1 Vonkajšia vrstva	16
2.2.2 Vnútna vrstva	16
2.3 Slepá časť sietnice	17
2.4 Optický nerv a optický disk	17
2.5 Cievne zásobenie sietnice	17
3 Patológie očnej sietnice	18
3.1 Diabetes mellitus	18
3.1.1 Klasifikácia	18
3.1.2 Diagnostika	18
3.1.3 Vyšetrenie očného pozadia	19
3.2 Diabetická retinopatia	22
3.2.1 Klasifikácia diabetickej retinopatie	23
3.2.2 Útvary v sietnici spojené s diabetickou retinopatiou	25
3.2.3 Liečba diabetickej retinopatie	26
3.3 Iné patológie očnej sietnice	26
3.3.1 Vekom podmienená degenerácia makuly (VPDM)	26
3.3.2 Hypertonická retinopatia	27
3.3.3 Cievne ochorenia sietnice	27
3.3.4 Odlúpenie sietnice	28
4 Spracovanie obrazu	29
4.1 Lokálne operátory	29
4.2 Transformácia kontrastu prostredníctvom histogramu	30
4.2.1 Ekvalizácia histogramu	31
4.3 Prahovanie	32
4.3.1 Globálne prahovanie	32
4.3.2 Lokálne prahovanie	33

4.4	Morfologické operácie	33
4.5	Hranovo orientovaná detekcia	35
4.5.1	Operátory využívajúce prvú deriváciu	35
4.5.2	Operátory využívajúce druhú deriváciu	36
4.5.3	Cannyho hranový detektor	37
4.5.4	Houghova transformácia	37
4.6	Region growing - semienková metóda	38
4.7	Watershed - metóda rozvodí	38
4.8	Zhlukovacie metódy segmentácie	39
4.8.1	K-means	40
5	Návrh programového riešenia	41
5.1	Predspracovanie	41
5.2	Detekcia optického disku	42
5.3	Detekcia krvného riečiska	44
5.4	Detekcia patologických útvarov	46
5.4.1	Detekcia exudátov	46
5.4.2	Detekcia mikroaneurizmov	47
5.5	Nesprávna detekcia útvarov	49
6	Testovanie a dosiahnuté výsledky	52
6.1	Dosiahnuté výsledky lokalizácie optického disku	53
6.2	Dosiahnuté výsledky segmentácie krvného riečiska	53
6.3	Dosiahnuté výsledky detekcie exudátov	54
6.4	Dosiahnuté výsledky detekcie mikroaneurizmov	54
6.5	Zhodnotenie účinnosti a využiteľnosti aplikovaného riešenia	55
	Záver	56
	Literatúra	57
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	61
	A Obsah príloh	62

Zoznam obrázkov

1.1	Oko	11
2.1	Sietnica zdravého oka	15
3.1	Priamy a nepriamy oftalmoskop	20
3.2	Štrbinová lampa	21
3.3	Fundus kamera.	22
3.4	Diabetická retinopatia	23
3.5	Microaneurizmus na sietnici	24
3.6	Exudát na sietnici	24
4.1	Gaussova funkcia	30
4.2	Ekvalizácia histrogramu	31
4.3	Dilatácia	34
4.4	Erózia	34
4.5	Princíp metódy rozvodí	39
4.6	Zhluková analýza	39
5.1	Farebné kanály snímku	41
5.2	Maska pozadia	42
5.3	Hľadanie regiónu záujmu (ROI).	43
5.4	Úprava ROI.	43
5.5	Vyhľadávanie optického disku v ROI	44
5.6	Lokalizovaný optický disk.	44
5.7	Úprava snímku pred lokalizáciou krvného riečiska	45
5.8	Segmentované krvné cievy	46
5.9	Maska obrysu sietnice.	47
5.10	Detekované exudáty.	47
5.11	Predspracovanie pred detekciou mikroaneurizmov	48
5.12	Detekované mikroaneurizmy.	48
5.13	Príklad nesprávnej detekcie optického disku.	49
5.14	Príklad nesprávnej detekcie krvných ciev.	50
5.15	Príklad nesprávnej detekcie exudátov.	50
5.16	Príklad nesprávnej detekcie mikroaneurizmov.	51

Zoznam tabuliek

6.1	Úspešnosť lokalizácie optického disku	53
6.2	Úspešnosť segmentácie krvného riečiska	54
6.3	Úspešnosť detekcie exudátov	54
6.4	Úspešnosť detekcie mikroaneurizmov	55

Úvod

Zrak je považovaný za jeden z najdôležitejších zmyslov. Pomocou zraku dokáže človek prijímať množstvo informácií z okolitého prostredia. Zrakovým orgánom je oko. Oko je orgánom, ktorý je počas života postihovaný rôznymi ochoreniami. Tieto ochorenia dokážu viac či menej ovplyvniť kvalitu života človeka. Len včasná diagnostika a liečba dokážu rapídne znížiť problémy spojené s ochorením.

Neoddeliteľnou a veľmi významnou časťou oka je sietnica. Obsahuje fotoreceptory, ktoré zachytávajú svetelné impulzy a sprostredkovávajú videnie. Z fotoreceptorov je podnet prenášaný pomocou nervových vlákien do mozgovej kôry, kde sa výsledný obraz spracováva a následne interpretuje.

Ochorenia postihujúcich oko je veľké množstvo, no medzi najzávažnejšie a najčastejšie radíme diabetickú retinopatiu, ktorá sa vyskytuje u pacientov postihnutých ochorením diabetes mellitus. Útvary vznikajúce v súvislosti s týmto ochorením je možné sledovať na snímkach v podobe tmavších či svetlejších útvarov ako sú mikroaneurizmy, hemorágie či exudáty.

Prítomnosť patologických útvarov na sietnici bude zistená pomocou automatickej detekcie. Tá využíva na detekciu množstvo známych metód spracovania obrazu akými sú prahovanie, filtrácia, zmena kontrastu, morfológické operácie a iné.

Ciele práce:

- popísať stavbu ľudského oka a ochorení, ktoré ovplyvňujú jeho správnu funkčnosť,
- navrhnúť programové riešenie pre automatickú detekciu patologických útvarov,
- testovať úspešnosť navrhnutého riešenia a stanoviť jeho možné využitie.

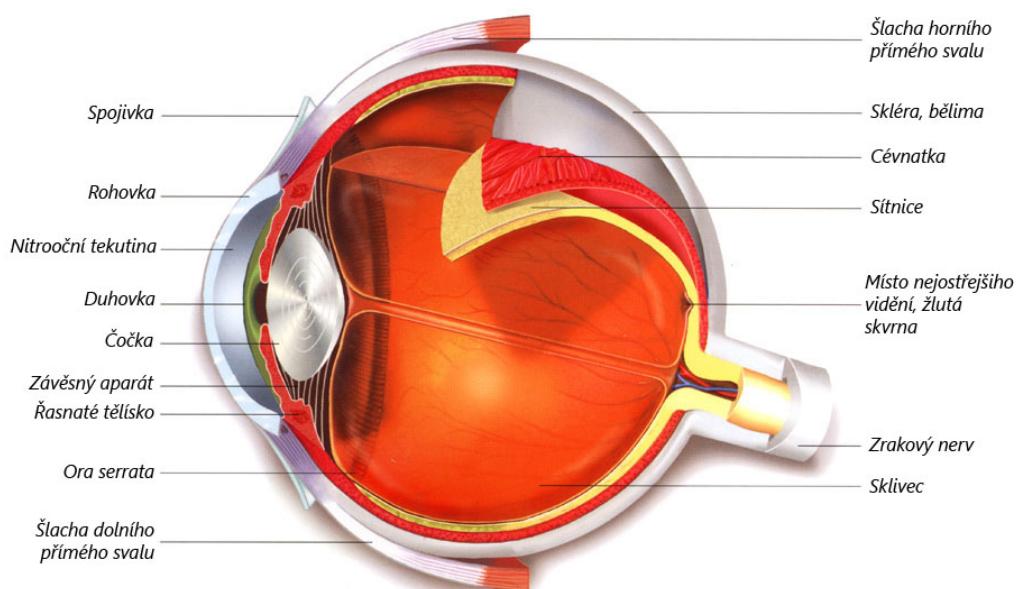
Práca je členená do šiestich kapitol. Kapitola 1 zahŕňa teoretické znalosti popisujúce stavbu a funkciu ľudského oka, kapitola 2 obsahuje podrobnejší opis sietnice, kapitola 3 podáva informácie o ochoreniach sietnice, kapitola 4 obsahuje metódy spracovania obrazu, v kapitole 5 je predstavená realizácia navrhnutého programového riešenia a kapitola 6 zhrňuje dosiahnuté výsledky a možnosti aplikácie takto zrealizovaného riešenia.

1 Oko

Periférna časť ľudského zrkového ústrojenstva je tvorená párom očí. Je to zložitý orgán, ktorý umožňuje vnímanie svetla, farieb, sprostredkuje vnímanie najväčšieho množstva informácií o okolitom prostredí a uľahčuje orientáciu v priestore. Orgán je umiestnený v očnici a je tvorený očnou guľou a prídavnými očnými orgánmi.

1.1 Anatómia oka

Očný bulbus (bulbus oculi) má približne guľovitý tvar o priemere asi 23 mm (vertikálny a priečny rozmer) x 24-26 mm (predozadný priemer). Je tvorený dvomi segmentami gule o rôznom polomere krivosti. Menší predný oddiel (rohovka) má polomer zakrivenia 7-8 mm, zadná časť (belima) má polomer zakrivenia 11-12 mm. V očnej štrbine medzi otvorenými viečkami je viditeľný len menší predný úsek očnej gule. Väčšia zadná časť je uložená hlboko v očnici. Očná guľa sa skladá z dvoch základných častí a to steny očnej gule a obsahu očnej gule. Obr. 1.1 popisuje všetky časti ľudského oka [32].



Obr. 1.1: Anatómia oka [3].

1.1.1 Stena očnej gule

Stena očnej gule sa skladá z troch vrstiev, ktoré sú usporiadané v smere z vonkajšej strany oka smerujúc k obsahu očnej gule. Ide o vrstvu vonkajšiu väzivovú, vrstvu prostrednú a vrstvu vnútornú.

Vonkajšia väzivová vrstva

Vonkajšia vrstva obsahuje belimu a rohovku.

Belima je pevná tuhá väzivová blana. Je tvorená prevažne lamelózne usporiadanými zväzkami kolagénnych a elastických fibríl. Je ochranným obalom pre hlbšie uložené časti očnej gule a predstavuje pevnú oporu pre pripojujúce sa okohybné svalstvo. Belima je prakticky bezcievna, preto má bielu farbu. Predný úsek belimy je krytý spojivkou. Na prednej strane belimy je malý otvor, do ktorého je ľahko vsadený okraj rohovky.

Rohovka uzatvára otvor asi o priemere 12 mm v prednom okraji belimy. Predná strana rohovky tvorí vrchol, zadná sa obracia do prednej komory očnej. Vonkajšia plocha je ukrytá vrstevnatým dlaždicovým epitelom. V tomto epitele nachádza svoje konečné miesto množstvo voľných nervových zakončení, preto je povrch rohovky citlivý na dotyk. Celkový tvar rohovky nie je úplne pravidelný. Jej vonkajšia plocha má tvar oválu, vnútorná tvar kruhu. Častým dôsledkom tejto nepravidelnosti je fyziologický astigmatizmus [19].

Prostredná vrstva

Prostredná vrstva je umiestnená hneď pod vrstvou vonkajšou a je veľmi tenká. Je tvorená prevažne riedkym väzivom s početnými pigmentovými bunkami. Obsahuje množstvo krvných ciev, z ktorých je zásobená prevažná časť očnej gule. Vďaka veľkému obsahu pigmentu a mohutných ciev sa uplatňuje tiež za svetelnú a teplotnú izolačnú vrstvu. V niektorých jej častiach sa nachádzajú hladké svalové bunky, ktoré sa podieľajú na regulácii vstupujúceho svetla a menia optickú mohutnosť šošovky (akomodácia oka).

Cievnatka je najrozsiahlejšou časťou prostrednej vrstvy. Má podobu tenkej čierneho-hnedej blany, ktorá je bohatá na cievy. Dutinová strana cievnatky je hladká a prilieha k nej sietnica. Táto časť je bohato pigmentovaná a pohlcuje svetelné lúče a tým zabráňuje presvetleniu oka. Je tvorená sieťou kapilár. Predstavuje tak tmavú komoru pre optickú vrstvu sietnice, ktorá zásobuje pigmentové bunky sietnice. Predný okraj cievnatky plynule pokračuje do riasnatého telieska.

Riasnaté teliesko má tvar zriadeného prstenca, ktorý je priložený na vnútornú stranu belimy a postupne s ňou zrástá. Zadný okraj telieska sa plynule zužuje a prechádza do cievnatky. Naopak smerom dopredu sa rozširuje a spojuje sa s dúhovkou.

Výbežky riasnatého telieska majú sekretorickú funkciu. Vylučujú do zadnej komory očný komorový mok. Podkladom telieska je väzivové stroma, v ktorom sú uložené hladké svalové bunky tvoriace sval ovládajúci závesný aparát.

Dúhovka tvorí najviac dopredu vysunutú časť prostrednej vrstvy očnej steny. Má tvar medzikruží s centrálnou uloženým otvorom zvaným zornica. Predný okraj dúhovky sa obracia proti rohovke. Medzi nimi vzniká predná komora očná. Predná plocha dúhovky je podľa množstva pigmentu individuálne sfarbená a podmieňuje farbu očí. Predná plocha dúhovky je rozdelená na dva nie zhodné prstence. Jeden má priemer väčší ako ten druhý. Na zadnú plochu nasadá pigmentová vrstva sietnice. Dúhovka plní predovšetkým úlohu clony [19].

Vnútna vrstva oka

Vnútna vrstva je tvorená sietnicou, ktorá vystiela celú dutinovú stranu očnej gule až k okraju dúhovky. Svojou vonkajšou plochou nalieha na prostrednú vrstvu očnej steny, na vnútornú plochu sa prikladá sklivec. Sietnica je rozdelená na dva segmenty a to predný a zadný. Zadná časť je považovaná za optickú časť sietnice, predná za slepú časť sietnice [26].

1.1.2 Obsah očnej gule

Obsah očnej gule pozostáva z priehľadných a čírych štruktúr, ktoré sú schopné prepúšťať svetelné lúče a sústredia ich na sietnicu. Medzi spomínané štruktúry patrí šošovka, sklivec a obsah prednej a zadnej komory očnej, ktoré sú vyplnené komorovým mokom.

Šošovka

Šošovka je priehľadný diskovitý útvar. Skladá sa z dvoch plôch, ktoré nemajú rovnaký polomer zakrivenia. Predná plocha je menej vyklenutá ako zadná. Predná plocha komory ohraničuje zadnú komoru očnú. Zadná plocha je súčasťou sklivca. Obe časti tvoria póly. Ich spojením vzniká os šošovky, ktorá je dlhá 3,6-4 mm. Rozmery šošovky sú pohyblivé v súvislosti so zmenou optickej mohutnosti. Fyziologickou hodnotou optickej mohutnosti neakomodovanej šošovky je okolo +20 dioptrií [33].

Sklivec

Sklivec je mäkká huspeninovitá a priehľadná hmota. Je vytvorená výpletom, ktorý je tvorený kolagénnymi vláknami, medzi ktorými sa nachádzajú bunky nazývané hyalocyty. V malých štrbinách medzi výpletom sa nachádza tekutina. Sklivec sa v

smere k sietnici zhusťuje a tvorí bazálnu membránu. Na prednej strane sklivca je prehĺbená malá jamka, do ktorej je vsunutá šošovka [33].

Očná komora

Očnými komorami sú nazývané dva štrbinové priestory nachádzajúce sa medzi zadnou plochou rohovky a prednou plochou šošovky, ich závesným aparátom a riasnatým telieskom. Delíme ich teda na prednú očnú komoru a zadnú očnú komoru. Obe komory sú naplnené komorovým mokom.

Predná očná komora je umiestnená medzi zadnou plochou rohovky, prednu plochou dúhovky a časťou šošovky v zornici. Rohovka a dúhovka sa spájajú v ostrý uhol, v ktorom sú prítomné trámčeky. Medzi trámčkami sa nachádzajú úzke štrbiny. Tie sa postupne otvárajú do kruhovitého Schlemmovho kanáliku. Endotelové trámčeky susedia s riasnatým telieskom. Touto cestou je z prednej komory odvádzaný komorový mok.

Zadná očná komora je úzka štrbina, ktorá je v prednej časti ohraničená zadnou plochou dúhovky. Zozadu je zadná očná komora tvorená prednou plochou šošovky, jej závesným aparátom a riasnatým telieskom [32].

Komorový mok

Komorový mok je číra tekutina vyplňujúca obe očné komory. Mok je produkováný výbežkami riasnatého telieska a aktívnym transportom z krvnej plazmy. Komorový mok preniká zo zadnej komory cez pupilu do prednej komory a je odvádzaný do Schlemmovho kanáliku. Jeho hlavnou úlohou je zaistenie metabolických funkcií predného segmentu oka a taktiež regulácií vnútroočného tlaku. Pri poruche odtoku komorového moku do žilného systému sa zvyšuje vnútroočný tlak, čo spôsobuje stav nazývaný glaukom [33].

2 Sietnica

Sietnica, obr. 2.1, je vlastným orgánom zraku a tvorí vnútornú vrstvu oka. Pokrýva celú dutinovú stranu očnej gule až k pupilárnemu okraju dúhovky. Sietnica funguje ako film vo fotoaparáte. Zachytáva obraz a zrakovým nervom ho posiela do zrakových centier v mozgu. Sietnica sa delí na dva stavebne a funkčne odlišné oddiely, optickú a slepú časť a sietnicu ako takú [26].



Obr. 2.1: Snímok zdravej očnej sietnice.

2.1 Optická časť sietnice

Optická časť sietnice je prvou z dvoch základných oddielov sietnice oka. Je funkčne najvýznamnejšou vrstvou steny očnej gule. Ide o tenkú a krehkú blanu o šírke asi 0,1-0,4 mm, ktorá nalieha na cievnatku. Počas oftalmoskopického vyšetrenia je optická časť známa svojou oranžovou až červenou farbou. Toto sfarbenie vzniká presvitaním ciev cievnatky. Na očnom pozadí rozoznávame niekoľko útvarov.

Jemne laterálne oproti zadnému pólu oka leží žltá škvrna kruhovitého až eliptického tvaru o priemere asi 3 mm. V jej strede sa nachádza malá priehlbinka, ktorá je považovaná za naostrejšie miesto videnia, pretože sa do nej premieta centrálny lúč. Táto priehlbina nesie názov fovea centralis. Pri oftalmoskopickom vyšetrení pomocou osvetlenia umelým svetelným zdrojom má toto miesto v porovnaní s okolím sýto červenú farbu. V oblasti žltej škvrny je možné zaznamenať vysokú hustotu čípkov.

Mediálne od žltej škvrny je prítomné belavé políčko, ktorým odstupuje z očnej gule zrakový nerv. Toto miesto má tvar kruhu o priemere asi 1,5 mm a jeho stred je jemne prehĺbený. Zrakový nerv je tvorený neuritmi multipolárnych neurónov a neobsahuje žiadne svetlocitlivé elementy. Predstavuje teda fyziologicky slepú škvrnu. Zo strednej časti políčka vstupuje do sietnice centrálna sietnicová žila a tepna, ktorých úlohou je zásobovanie sietnice krvou. Ich úlohou je aj zásobovanie žltej škvrny [33].

2.2 Mikroskopická stavba sietnice

Mikroskopická stavba sietnice je veľmi zložitá, pretože ju tvorí až 11 vrstiev. Z nich najvýznamnejšie a pre funkčnosť sietnice najdôležitejšie sú vonkajšia a vnútorná vrstva.

2.2.1 Vonkajšia vrstva

Vonkajšia vrstva, ktorá prilieha k cievnatke, je tvorená jednovrstvovým epitelom, ktorého bunky sú preplnené pigmentom. Táto vrstva spolu s pigmentovou vrstvou cievnatky pôsobí ako svetelne izolačná plocha, ktorá pohlcuje dopadajúce lúče a tým zabraňuje ich odrazu vo vnútri oka. Často je kvôli tomu označovaná ako „čierna komora“ [32].

2.2.2 Vnútorná vrstva

Vnútorná vrstva obsahuje vlastné primárne zmyslové bunky (fotoreceptory) a neuróny, ktoré zbierajú informácie z fotoreceptorov a odvádzajú ich prostredníctvom zrakového nervu do mozgu. Zmyslové bunky sietnice tvoria vo svojom súbore zmyslový epitel oka. Zmyslové bunky sa v sietnici vyskytujú v dvoch podobách a to ako tyčinky a čípky. Súčasťou vnútornej vrstvy sietnice je aj časť nazývaná makula (žltá škvrna).

Tyčinky registrujú množstvo dopadajúceho svetla a predstavujú väčšinu zmyslových buniek sietnice. Ich celkový počet je asi 120 miliónov. Úlohou tyčíniek je sprostredkovanie zrakového vnemu pre videnie za zlých svetelných podmienok. Nimi vytvorený obraz je monochromatický. Tyčinky sú omnoho citlivejšie ako čípky a môžu registrovať svetelný vnem o veľmi nízkej intenzite. Tyčinka je dlhá asi 120 μm . Ide o tenkú bunku, ktorá obsahuje zrakový pigment rodopsin, ktorý je lokalizovaný do diskov, ktoré tvoria vonkajšie segmenty fotoreceptorov. Základnou funkciou fotoreceptorov je premena svetelnej energie na elektrický signál.

Čípky slúžia ku vnímaniu farieb. V porovnaní s tyčinkami je ich omnoho menej. Ich celkový počet sa pohybuje okolo 5-7 miliónov. Nachádzajú sa v mieste nazývanom žltá škvrna, kde predstavujú jediný typ zmyslových buniek. Sú väčšie než tyčinky a slúžia k vnímaniu farieb. Aj napriek tomu, že ich je podstatne menej ako tyčíniek, sprostredkovávajú za denného svetla vysoko kvalitný farebný vnem. Ich vodivé výbežky naväzujú synapsiami na vrstvu malých bipolárnych neurónov. Na vodivé výbežky týchto bipolárnych neurónov naväzuje vrstva veľkých multipolárnych neurónov, ktoré sú spojené do vlákien optického nervu. Medzi všetkými nervovými bunkami sú uložené veľké množstvá podporných buniek a drobné asociačné neuróny. Fotopigmentom, ktorý je obsiahnutý v čípkoch je opsin. Delí sa na červený, zelený a

modrý opsin. U človeka môžeme teda hovoriť o prítomnosti 3 druhov čípkov. Podľa farieb ide o spektrá, ktoré môžu vnímať a to je červené, zelené a modré spektrum [26].

Makula (žltá škvrna) je najcitlivejším miestom sietnice. Tvoria ju milióny fotoreceptorov - čapíkov. Uprostred makuly sa nachádza oblasť nazývaná fovea, ktorá je považovaná za najostrejšie miesto videnia.

Vrstvy sietnice sú usporiadané tak, aby svetelný lúč musel prejsť všetkými vrstvami sietnice predtým ako sa dostane k svetlocitlivým výbežkom tyčiniek a čípkov [26].

2.3 Slepá časť sietnice

Slepá časť sietnice kryje vnútornú plochu riasnatého telieska a dúhovky. Stavba tejto časti sietnice je veľmi jednoduchá, pretože je tvorená len pigmentovou vrstvou a neobsahuje žiadne zmyslové bunky. Často je označovaná ako pigmentový list riasnatého telieska a dúhovky [33].

2.4 Optický nerv a optický disk

Fotoreceptory sú pripojené na nervové vlákna, ktoré sa spoločne zbierajú vo zväzok vlákien nazývaný optický nerv. Ten prenáša vzruch z oka do mozgu, ktorý je prekonvertovaný z obrazu na elektrický signál pomocou fotoreceptorov. Prvá časť optického nervu nazývaná optický disk (slepá škvrna) je miestom, ktoré neobsahuje žiadne fotoreceptory. Kvôli tomuto nie je z miesta optického disku prenášaný žiadny signál [33].

2.5 Cievne zásobenie sietnice

Sietnica svojou vysokou hustotou buniek a komplexným usporiadaním neurónov vytvára vysoko usporiadané mikroprostredie, ktoré je potrebné pre množstvo prebiehajúcich interakcií a procesov. Vysoko špecializovaný systém je pre správne fungovanie všetkých sietnicových funkcií potrebný. Cievny systém sietnice je tvorený sietnicovými artériami a vénami, kapilárnou sieťou a cievnatkou. Cievnatka predstavuje najvýraznejšiu vaskularizovanú časť oka. Je životne dôležitá pre vyživovanie fotoreceptorov [26], [32].

3 Patológie očnej sietnice

Patológií vyskytujúcich sa na sietnici je celá rada. Ide o ochorenia zápalového pôvodu, genetické postihnutie alebo rôzne zmeny na sietnici vznikajúce v súvislosti s vysokým krvným tlakom, diabetom mellitom, obehovými poruchami a v neposlednom rade v dôsledku poranenia. Vzhľadom k tomu, že sietnica je jedným z najdôležitejších orgánov zraku, jej správne fungovanie bez akýchkoľvek patológií je nevyhnutné pre bezproblémové videnie.

3.1 Diabetes mellitus

Diabetes mellitus je ochorenie charakterizované zvýšenou hladinou glukózy v krvi (hyperglykémiou) v dôsledku čiastočného alebo absolútneho nedostatku inzulínu, hormónu produkovaného v β -bunkách Langerhansových ostrovčekoch pankreasu [10].

3.1.1 Klasifikácia

Diabetes mellitus sa delí na 4 typy:

- diabetes 1.typu,
- diabetes 2.typu,
- ostatné špecifické typy diabetu mellitu,
- gestačný diabetes mellitus.

U pacientov trpiacich týmto ochorením sa najčastejšie objavuje diabetes mellitus 1. a 2. typu.

Diabetes 1.typu

Diabetes mellitus 1.typu je charakterizovaný absolútnym alebo takmer absolútnym nedostatkom endogénneho inzulínu [10]. Ochorenie vzniká v dôsledku selektívnej deštrukcie β -buniek Langerhansových ostrovčekov pankreasu.

Diabetes 2.typu

Diabetes mellitus 2.typu vzniká v dôsledku poruchy sekrécie β -buniek Langerhansových ostrovčekov a inzulínovej rezistentnosti. Inzulínová rezistentnosť sa prejavuje znížením koncentrácie a účinku inzulínu v cieľových bunkách [10].

3.1.2 Diagnostika

Potvrdenie prítomnosti diabetu mellitu podlieha niekoľkým kritériám [18]:

- kombinácia klinických symptómov s náhodným stanovením koncentrácie glukózy v plazme $\geq 11,1$ mmol/l,
- koncentrácia glukózy v plazme nalačno $\geq 7,0$ mmol/l,
- koncentrácia glukózy v plazme pri orálnom glukózovom tolerančnom teste $\geq 11,1$ mmol/l,
- k stanoveniu záveru o diagnóze diabetu je potrebné potvrdiť výsledok opakovaným meraním z ďalšieho odberu po pár dňoch.

3.1.3 Vyšetrenie očného pozadia

Vyšetrenie očného pozadia patrí v ordinácii očného lekára medzi kľúčové spôsoby určovania diagnózy pacientov. Je neoddeliteľnou súčasťou pravidelnej starostlivosti o zrak. Veľké množstvo očných ochorení je možné spoľahlivo odhaliť len za pomoci vyšetrenia očného pozadia.

Pri tomto vyšetrení je možné skontrolovať viacero častí očného pozadia. Možno skontrolovať očný nerv, makulu, sklovec, sietnicu a cievy oka. Pred vyšetrením sa aplikujú špeciálne kvapky, ktoré dočasne rozšíria zreničku, a tým umožnia zlepšenie viditeľnosti počas vyšetrenia aj v oblasti šošovky oka.

Lekár takto dokáže odhaliť ochorenia ako sú vekom podmienená degenerácia makuly, zmeny na sietnici spôsobené vysokým krvným tlakom alebo diabetom mellitom, glaukómové ochorenia, cievne ochorenia, diery a trhliny na sietnici, odlúpenie sietnice, ale aj nádorové ochorenia v oku.

Vyšetrenie očného pozadia je súčasťou všetkých typov predoperačných vyšetrení, kompletného vyšetrenia, vyšetrenia očnej koherenčnej tomografie, vyšetrenia perimetrom aj niektorých špecializovaných očných vyšetrení. Základnými spôsobmi, ktorými lekár dokáže vyšetriť očné pozadie sú však priama a nepriama oftalmoskopia, štrbinová lampa a fundus kamera.

Oftalmoskopia

Oftalmoskopia je vyšetrenie, ktoré sa nazýva aj vyšetrenie pohľadom. Za pomoci oftalmoskopie lekár dokáže vyšetriť zadný segment oka, sietnicu a terč zrkovitého nervu. Princíp oftalmoskopie spočíva v osvetlení vnútra oka svetlom o dostatočnej intenzite. Zaznamenávajú a pozorujú sa lúče odrazené od sietnice. Takto odrazené lúče je však možné pozorovať iba vtedy, ak je os pozorovania súhlasná alebo veľmi blízka osi osvetlenia. Rozlišujeme priamu a nepriamu oftalmoskopiu.

- **Priama oftalmoskopia**

Priama oftalmoskopia využíva prístroj zvaný priamy oftalmoskop, obr. 3.1. Ide o ručne prenosné, nie veľmi rozmerné zariadenie, ktoré umožňuje jednoduché vyšetrenie sietnice. Svetelný zdroj potrebný pre vyšetrenie je umiestnený tesne pod okienkom, cez ktoré dochádza k pozorovaniu sietnice. Sietnica je pozorovaná z pomerne krátkej vzdialenosti a to približne 2 cm a vyšetrujúci používa jedno oko. Obraz je zväčšený úmerne optickej mohutnosti oka. Pri jednom sklone oftalmoskopu je možné pozorovať približne 2 mm oblasť sietnice, preto potrebujeme pre pozorovanie väčšej oblasti sietnice meniť náklon oftalmoskopu, prípadne zmeniť pohľad vyšetrovaného oka.

Priama oftalmoskopia prináša teda detailný obraz vyšetrovaného oka, no je v celku neprehľadná. Častou chybou je tiež fakt, že sa stráca priestorová orientácia vzhľadom k tomu, že sú štruktúry pozorované jedným okom [13].

- **Nepriama oftalmoskopia**

Nepriama oftalmoskopia využíva prístroj zvaný nepriamy oftalmoskop, obr. 3.1. Vyšetrenie pomocou nepriameho oftalmoskopu sa vykonáva z väčšej vzdialenosti a to približne 50 cm. Toto vyšetrenie sa robí za pomoci vyšetrovacej šošovky, ktorá je najčastejšie asférická spojka. Vyšetrujúci lekár ju drží pred okom vo vzdialenosti, ktorá odpovedá jej ohniskovej vzdialenosti a cez túto šošovku osvetľuje a zároveň pozoruje sietnicu. Zdroj svetla sa nachádza na čelenke, ktorú ma vyšetrujúca osoba na hlave. Na tejto čelenke sú umiestnené okuliare pre obe oči. Obraz sietnice sa zobrazí reálne a prevrátené medzi okom vyšetrujúceho lekára a vyšetrovanej osoby.

Veľkou výhodou, ktorú má výsledný obraz získaný nepriamou oftalmoskopiou oproti priamej je, že obraz je menej zväčšený a je zobrazená väčšia časť sietnice [13].



Obr. 3.1: Vľavo rôzne typy priamych oftalmoskopov, vpravo nepriamy oftalmoskop [13].

Štrbinová lampa

Štrbinová lampa, obr. 3.2, je v oftalmológii jedným z najpoužívanějších prístrojov. Predovšetkým sa využíva na vyšetrenie predného segmentu oka (dúhovka, rohovka, šošovka). Pri použití doplnkových častí je možné za pomoci štrbinovej lampy vyšetriť aj zadný segment. Lampa sa skladá z dvoch častí. Ide o časť zväčšovacíu a osvetľovaciu. Svetelný zdroj prechádza úzkou štrbinou. Svetlo, ktoré touto štrbinou prejde je lekárom zamierené priamo do oka vyšetrovaného. Tým je presne nasvietená vyšetrovaná oblasť. Lekár dokáže za pomoci zväčšovacej časti niekoľkonásobne zväčšiť vyšetrovanú oblasť, vďaka čomu dokáže zachytiť aj veľmi malé príznaky akéhokoľvek ochorenia [14], [13].



Obr. 3.2: Štrbinová lampa.[13].

Fundus kamera

Na veľmi podobnom zobrazovacom princípe ako nepriama oftalmoskopia fungujú viaceré prístroje schopné ukladať snímok sietnice ako digitálny obraz. Jedným z takýchto prístrojov je aj fundus kamera.

Fundus kamera, obr. 3.3, je zložená z niekoľkých častí potrebných pre snímanie očného pozadia. Kamera s čipom, ktorá je zodpovedná za vytváranie snímok očného pozadia je umiestnená na prístroji, ktorý obsahuje sústavu šošoviek a zrkadiel, ktoré umožňujú fokusáciu svetelných lúčov na očné pozadie. Fundus kamera dokáže snímať 30 - 50° oblasti sietnice, pričom veľkým bonusom je fakt, že obrazový záznam je okamžitý. Výstupom fundus kamery je digitálna fotografia, ktorá je niekoľkokrát

zväčšená a priama. Bezkonkurenčnou výhodou v porovnaní s oftalmoskopiou je, že získané snímky môžu byť uložené na pamäťové médium a následne porovnávané.

Snímky získané z fundus kamery sa používajú pre sledovanie stavu sietnice alebo pre diagnostiku ochorení na sietnici [13].

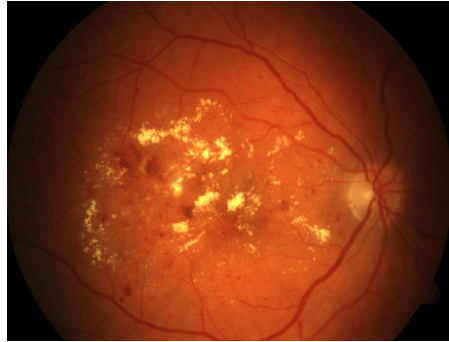


Obr. 3.3: Digitálna fundus kamera.[13].

3.2 Diabetická retinopatia

Diabetická retinopatia, obr. 3.4, je ochorenie očnej sietnice, ktoré vzniká ako následok diabetu mellitu. Dochádza k nej poškodením retinálnej kapilárnej siete. To vedie k ťažkej poruche dynamiky krvného obehu v sietnici a narušeniu vnútornej rovnováhy sietnice. U diabetikov dochádza k diabetickej retinopatii až po viac ako desiatich rokoch trvania ochorenia. Vzniká a prebieha často veľmi nenápadne. Primárne sa pacientom trpiacim týmto ochorením zhoršuje zraková ostrosť, no časom môže viesť až k úplnej slepote. V súčasnosti oslepne v dôsledku diabetickej retinopatie asi 2-3% diabetikov [23]. Cievny nachádzajúce sa v sietnici zohrávajú dve dôležité úlohy pre správne vyživovanie sietnice. Prvou z nich je distribúcia kyslíku a potrebných živín až k cieľovým tkanivám očnej sietnice. Druhou úlohou ciev je odvádzanie vyprodukovaných odpadových metabolitov preč z tkaniva. Pri správnom fungovaní zohráva najdôležitejšiu úlohu práve cievna stena, ktorá je v dôsledku diabetickej retinopatie poškodená. V dôsledku poškodenia cievnej steny nie je možné prepúšťať látky v správnom množstve a dochádza k zvýšeniu permeability cievnej steny.

Dochádza tak k nepožadovanej priepustnosti molekúl väčších rozmerov ako napríklad lipidov do sietnice, kde sa tieto molekuly zhromažďujú a tvoria malé stvrdnuté miesta, ktoré predstavujú pre sietnicu často nenávratné poškodenia smerujúce v niektorých prípadoch až k slepote [19],[21].



Obr. 3.4: Sietnica ľudského oka postihnutá diabetickou retinopatiou.

3.2.1 Klasifikácia diabetickej retinopatie

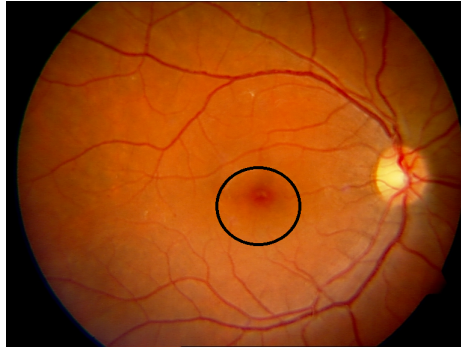
Diabetická retinopatia sa delí na dve základné formy:

- neproliferatívna diabetická retinopatia (NPDR),
- proliferatívna diabetická retinopatia (PDR).

Po diagnostike prítomnosti NPDR alebo PDR sa neskôr rieši prítomnosť či neprítomnosť diabetickej makulopatie.

Neproliferatívna diabetická retinopatia (NPDR)

Neproliferatívna diabetická retinopatia je štádium diabetickej retinopatie, pri ktorom vznikajú na malých cievach výdute nazývané mikroaneuryzmy, obr. 3.5. Mikroaneuryzmy často praskajú a tak vznikajú drobné krvácania na sietnici. Vo väčšine prípadoch sa za príznak NPDR považuje aj ukladanie látok tukového pôvodu v sietnici v podobe žltkastých usadenín nazývaných exudáty, obr. 3.6. V tomto stave pacient zväčša nepocituje žiadne ťažkosti [21].



Obr. 3.5: NPDR v podobe mikroaneuryzmu na sietnici ľudského oka.



Obr. 3.6: NPDR v podobe exudátu na sietnici ľudského oka.

Proliferatívna diabetická retinopatia (PDR)

Proliferatívna diabetická retinopatia sa považuje za najzávažnejšiu formu diabetickej retinopatie. Sietnica obsahuje množstvo ťažko poškodených ciev. Ich poškodenie vyvoláva novotvorbu ciev, ktoré sú rovnako poškodené. Dochádza ku značnému krvácaniu až do sklovca. Pacient sa v tomto prípade sťažuje na zhoršenie videnia a plávajúce čierne machule pred očami. V konečnom štádiu PDR môže dôjsť až k tvorbe väzivového tkaniva, ktoré môže nadvihnúť a odlúpiť celú sietnicu, čo vedie k úplnej slepote [21].

Diabetická makulopatia

Diabetická makulopatia, inak nazývaná aj diabetický makulárny edém, je ochorenie sietnice, ktoré postihuje makulu diabetikov v súvislosti s diabetickou retinopatiou. V prípade diabetickej makulopatie dochádza k poškodeniu steny sietnicových ciev, čo vedie k presunu krvných buniek a séra do sietnice a následne k jej poškodeniu [9]. Vzhľadom k tomu, že makula je miestom najostrejšieho videnia, jej poškodenie

ovplyvňuje ostrosť videnia pacienta.

3.2.2 Útvary v sietnici spojené s diabetickou retinopatiou

Mikroaneuryzmy

Mikroaneuryzmy sú útvary, ktoré sú prvými príznakmi prítomnosti začínajúcej, teda neproliferatívnej diabetickej retinopatie. Sú to malé výdute sietnicových kapilár, ktoré majú porušenú stenu kapiláry. V dôsledku narušenej steny cievy presakujú a krv sa tým rozptyluje v sietnici. Mikroaneuryzmy sú teda definované ako malé červené okrúhle škvrny s pomerne výraznými okrajmi, ktoré sa nachádzajú v blízkosti ciev. Z mikroaneuryzmov sa pri presakovaní stávajú tvrdé drobné útvary nazývané exudáty, ktoré sú často sprevádzané edémom. V prípade úplného poškodenia stien na cievach a teda úplného prasknutia stien vznikajú intraretinálne útvary nazývané hemorágie [29].

Hemorágie

Hemorágie vznikajú v dôsledku zoslabnutia stien ciev alebo mikroaneuryzmov a ich následného prasknutia. V pokročilom štádiu proliferatívnej diabetickej retinopatie môže v súvislosti s tvorbou exudátov dôjsť až k zakrvaveniu sklovca. Podľa tvaru rozoznávame tri typy hemorágií [8]:

- bodkované retinálne hemorágie - drobné okrúhle hemorágie, nachádzajú sa vo vnútornej alebo vonkajšej vrstve sietnice, vznik je takmer vždy spôsobený prasknutím mikroaneuryzmov,
- plamienkové hemorágie - väčšie než bodkované do veľkosti 1,5 mm, umiestnené pod vrstvou nervových vlákien, dôsledkom vzniku málo rozvinutej DR a hypertenzie,
- škvrnité hemorágie - sú uložené najhlbšie z 3 možných typov a to až na úrovni vnútornej kapilárnej siete, vznikajú v dôsledku ischemických ochorení a pokročilejšieho štádia DR.

Exudáty

Exudáty sa delia na dva typy a to tvrdé a mäkké exudáty. Tvrdé exudáty sú útvary, ktoré sú pôvodom väčšie molekuly nahromadené v sietnici. Ide o nahromadenosť lipidov, fibrínu a proteínov. Sú to tvrdé zhluky, ktoré majú žltkastú farbu, majú ostré hrany a sú uložené v ktorejkoľvek vrstve sietnice. Vznikajú ako následok presakovania cievnych kapilár a s nimi spojenými mikroaneuryzmami. Svojou farbou a tvarom sú veľmi často podobné optickému disku, preto je potrebné pri detekcii zvýšiť pozornosť, aby bol správne detekovaný exudát. Najlepšie je optický disk zo snímku odstrániť.

Mäkké exudáty sú útvary, ktoré sa často nazývajú vatovými ložiskami. Považované sú predovšetkým za prejavy ischemických infarktov nervových vlákien. K infarktom takéhoto typu dochádza v dôsledku blokovania malých tepien na úrovni nervových vlákien sietnice. V blízkosti mäkkých exudátov v sietnici sa veľmi často nachádzajú mikroaneuryzmy aj hemorágie [8].

Ďalšie klinické zmeny na úrovni sietnice v súvislosti s DR

- žilové abnormality,
- intraretinálne mikrovaskulárne abnormality (IRMA),
- fokálna sietnicová depresia,
- neovaskularizácie sietnice.

3.2.3 Liečba diabetickej retinopatie

Prvým a základným krokom v liečbe DR je stabilizácia hladiny glykémie. Dôležitým údajom v stanovení je množstvo glykovaného hemoglobínu, ktorého hodnota by nemala presahovať 7 %. Dôležitá je aj liečba pridružených metabolických ochorení, teda množstvo lipidov alebo kontrola krvného tlaku. Z oftalmologického hľadiska je najvýznamnejším postupom liečby DR liečba nazývaná laserová koagulácia sietnice. Táto liečba je vykonaná v lokálnej anestézii. Princíp laserovej koagulácie sietnice spočíva v inaktivácii zón, ktoré by mohli produkovať vaskulárny endoteliálny rastový faktor (novotvorba ciev) a miesta s masívnym presakovaním. Už spomínaná laserová koagulácia môže byť priama alebo panretinálna. O výbere typu laserovej koagulácie rozhoduje lekár na základe závažnosti DR, ale aj prítomnosti iných rizikových faktorov. Priama koagulácia, inak nazývaná aj cielená laserová koagulácia, sa uplatňuje na uzatvorenie presakujúcich ciev alebo fixáciu poškodených okrajov ciev. Panretinálna laserkoagulácia sietnice je aplikovaná v momente, kedy je požadovaným cieľom odstránenie časti neokysličenej sietnice a zároveň aj zlepšenie okysličenia jednotlivých častí sietnice [8].

3.3 Iné patológie očnej sietnice

3.3.1 Vekom podmienená degenerácia makuly (VPDM)

Vekom podmienená degenerácia makuly je charakterizovaná ako prerastenie centrálnej časti sietnice (makuly) novými cievnymi vlásoknicami, ktoré je úzko späté s vekom. Klasifikácia VPDM spadá do 2 častí.

Suchá forma VPDM

Suchá forma VPDM je typická tým, že pri nej dochádza k úbytku buniek na sietnici a vzniku atrofie, k tvorbe drúz rôznej veľkosti a množstva a zároveň aj k presunu pigmentových buniek. Vývoj ochorenia je postupný a priebehom času často vedie k ďalším komplikáciám v rámci videnia. Asi u 20 % pacientov so suchou formou sa vyvinie vlhká forma degenerácie makuly [21].

Vlhká forma VPDM

Vlhká forma VPDM sa inak nazýva aj neovaskulárna forma. Predstavuje asi 15 % všetkých prípadov VPDM, no zodpovedá za väčšinu prípadov straty zraku. Toto ochorenie súvisí s rastom nových patologických ciev pod makulou, ktoré prepúšťajú krv a na sietnici vzniká zakrvácanie a opuch. Včasná diagnostika pri tomto type ochorenia je obzvlášť dôležitá, vzhľadom k tomu, že v krátkom čase dokáže viesť k totálnej deštrukcii správneho fungovania makuly [21].

3.3.2 Hypertonická retinopatia

Hypertonická retinopatia sa vyznačuje zmenami na artériách, žilách či nervoch sietnice v dôsledku vysokého krvného tlaku. Pri vysokom krvnom tlaku môže viesť až k presakovaniu krvi a iných tekutín z ciev do sietnice alebo do sklovca. Cievne zmeny vytvorené v dôsledku hypertonickej retinopatie sa vytvárajú prvočne veľmi pomalo až nepozorovane, no neskôr môžu viesť k poruchám zorného poľa či zníženiu ostrosti videnia. Dôležitým postupom pri liečbe hypertonickej retinopatie je dosiahnutie normálnych hodnôt krvného tlaku [23].

3.3.3 Cievne ochorenia sietnice

Cievne ochorenia sietnice sú ochorenia spojené priamo s poruchami centrálnej sietnicovej cievy a tepny. Ich uzáver, či už nejakým útvarom alebo trombotickým procesom vyvolá na očnom pozadí obehovú poruchu [6].

Embólia centrálnej sietnicovej tepny

Embólia tepny preruší dodávku krvi v dôsledku upachatia tepny. Očné pozadie nadobudne belavú farbu. Cievky sú prázdne a len žltá škvrna má červenú farbu, pretože za jej krvné zásobenie nezodpovedá tepna, ale cievnatka [6].

Trombóza sietnicových ciev

Trombóza znemožní návrat krvi. V dôsledku veľkého obsahu krvi v sietnici je sietnica nadmerne prekrvená a žily sú nepožadovane rozšírené. Pokiaľ trombóza zasiahne len niektorú cievnu vetvu, videnie je znemožnené len v oblasti takto upchatej žily. V prípade centrálného uzáveru je videnie znížené na praktickú slepotu. Krvácanie prítomné v sietnici sa veľmi pomalo vstrebáva. To je príčinou tvorby jaziev prítomných na očnom pozadí [8].

3.3.4 Odlúpenie sietnice

Odlúpením sietnice nazývame stav, kedy sa odlúči zmyslová vrstva sietnice od pigmentového epitelu. Vznikajú trhliny najčastejšie v hornej polovici periférnej sietnice. Takto vzniknutý priestor je vyplnený tekutinou. Pri vzniku primárneho odchlípenia sietnice zohráva dominantnú úlohu sietnicová trhлина najrôznejších tvarov. Pacient postihnutý odlúpením sietnice spočiatku vidí lietajúce sadze a záblesky, neskôr sa mu v zornom poli z niektorej strany objaví spúšťajúca sa záclona. Pokiaľ nie je včas tento problém operovaný, oko oslepne [21], [14].

4 Spracovanie obrazu

Spracovanie obrazu je pojem, ktorý zahŕňa rôzne typy algoritmov a metód, ktoré dokážu zo vstupného obrazu vyňať informácie potrebné k detekcií určitých útvarov či objektov v snímkach. Pre úspešnú detekciu patológií na sietnici ľudského oka je potrebné poznať v prvom rade prejavy konkrétnej patológie, ktoré boli popísané v predošlých kapitolách. Dôležité je poznať aj metódy spracovania obrazu, ktoré umožnia vytvorenie správneho algoritmu a následné správne detekovanie patológií. Táto kapitola predstavuje niekoľko metód použitých na správnu detekciu patológií očnej sietnice.

4.1 Lokálne operátory

Úprava obrazu za pomoci lokálnych operátorov zohráva dôležitú úlohu v rámci odstránenia nežiadúcich artefaktov, najčastejšie v podobe šumu, prítomných v snímkach. Metóda pre odstránenie šumu či iných rušivých elementov je viac. Líšia sa predovšetkým tým, aký typ rušivého elementu riešia, ale aj výpočtovou náročnosťou či efektivitou pri odstraňovaní. Problém, ktorý so sebou prívotná úprava nesie je, že počas akejkoľvek úpravy a odstraňovaní šumu dochádza k rozmazaniu hrán, ktoré nesú dôležitú informáciu o útvere v snímke, [12].

Priemerovanie

Priemerovanie obrazu je vlastne konvolúcia obrazu s normalizovanou maskou. Každý pixel, ktorý je prekrytý touto maskou je vynásobený koeficientom v danej bunke. Následne sú všetky tieto hodnoty sčítané, [12]. Takýmto postupom vznikne jeden nový pixel. Konvolučná maska o rozmere 3 x 3 by vyzerala nasledovne, 4.1:

$$h = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

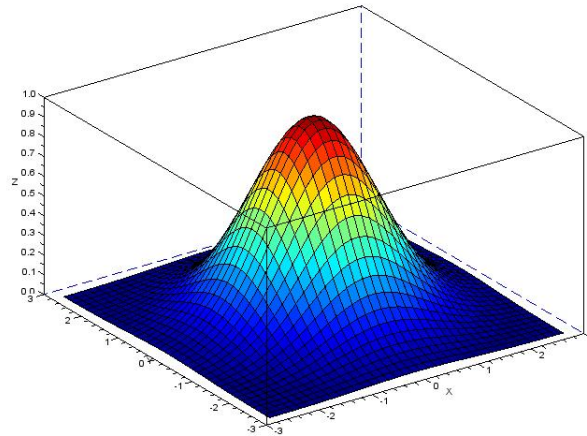
Gaussovo rozmazanie

Gaussovo rozmazanie je metóda, ktorá rovnako ako priemerovanie nachádza svoje uplatnenie v odstránení šumu z analyzovaných snímkov. Táto metóda sa využíva v predspracovaní snímky. Takto pripravený a predspracovaný snímok je posunutý na ďalšiu prácu s ním.

Metóda spočíva v konvolúcii snímky s maskou. Maska je vytvorená z elementov, ktoré vychádzajú z Gaussovej funkcie 4.1. Rozmery masky sa teda vypočítajú podľa rovnice 4.2:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.2)$$

kde x a y sú súradnice v snímke, σ^2 predstavuje smerodiatnú odchýlku udávajúcu šírku Gaussovej funkcie, [12].



Obr. 4.1: Gaussova funkcia.

Mediánové vyhladenie

Vyhľadenie snímky mediánom je metóda, ktorá sa často využíva pre odstránenie impulzného šumu, pretože je v tomto prípade veľmi účinná. Táto metóda sa využíva často aj kvôli tomu, že rozmazanie hrán nie je také výrazné ako u iných vyhladzovacích metód. Pri mediánovej filtrácii je podstatou posúvanie okna o určitej veľkosti po snímke [34]. Pri každom posunutí je stredovej, spracováwanej, hodnote priradená mediánová hodnota jasů z hodnôt, ktoré sa nachádzajú v okolí v rámci okna. Hodnoty v rámci okna sú teda zoradené podľa veľkosti a je vybraná hodnota, ktorá sa nachádza uprostred [12]. Táto hodnota nahradí už spomínanú spracovávanú hodnotu.

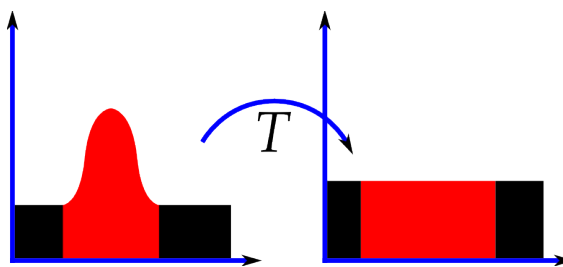
4.2 Transformácia kontrastu prostredníctvom histogramu

Histogram predstavuje relatívnu frekvenciu výskytu rôznych úrovní šedi v obrázku. Tvar histogramu obrázka nesie dôležité informácie o jednotlivých hodnotách jasů v obraze. V prípade, že je histogram obrázka veľmi úzky, znamená to, že obrázok je

veľmi zle viditeľný a obsahuje málo úrovní odtieňov šedej. Obrázok, ktorý má úzky histogram je potrebné upravovať tak, aby histogram dostal široko distribuovaný tvar. Takto upravený obrázok obsahuje viac úrovní šedi a je lepšie viditeľný. Úpravu histogramu dosiahneme ekvalizáciou histogramu.

4.2.1 Ekvalizácia histogramu

Ekvalizácia histogramu je neklesajúca lineárna transformácia obrazu, ktorej úlohou je zabezpečiť rovnomerné zastúpenie jednotlivých hodnôt jasu v obraze, [28]. Histogram ekvalizovaného obrazu by mal teda byť ideálne plochý a stupne šedi by sa mali v obraze vyskytovať s rovnakou pravdepodobnosťou, obr. 4.2.



Obr. 4.2: Príklad histogramu pred a po ekvalizácii [2].

Adaptívna ekvalizácia histogramu

Existuje aj modifikácia algoritmu ekvalizácie histogramu, ktorá umožňuje ekvalizáciu histogramu len nad určitou časťou. Obraz je rozdelený na menšie časti a histogram každej jednej časti sa ekvalizuje. Táto metóda je preto vhodná na zvýraznenie jemnejších hrán v obraze. Ide o adaptívnu ekvalizáciu histogramu [28].

Adaptívne rozdelenie histogramu s obmedzením kontrastu (CLAHE)

U adaptívnej ekvalizácie histogramu sa môže stať, že ak má spracovávaná oblasť malý rozsah hodnôt, môže byť nadpriemerne zvýraznený šum, či iné rušivé artefakty. Pre zamedzenie šumu sa využíva CLAHE. Táto metóda modifikuje adaptívnu ekvalizáciu tak, že stanovuje maximálnu početnosť určitej hodnoty v histograme. Hodnoty, ktoré presahujú túto početnosť však nie sú z histogramu vylúčené, ale sú rovnomerne roz distribuované do celého histogramu [28].

4.3 Prahovanie

Prahovanie je najjednoduchšou metódou segmentácie, no aj napriek tomu býva často veľmi úspešná. Je výpočtovo aj časovo nenáročná. Metóda je založená na hodnotení intenzity pixelov. Podstatou je nájdenie prahovej hodnoty (T), podľa ktorej sa vyhodnocuje každý jeden pixel danej snímky. V prípade, že hodnota jasnosti na danom pixeli je väčšia ako T , tomuto bodu sa priradí hodnota 1. V opačnom prípade sa bodu priradí hodnota 0. Snímok bude teda v konečnom dôsledku prevedený na snímok obsahujúci čiernu a bielu. Prah (T) sa stanovuje rôznymi spôsobmi. Môže byť stanovený samotným užívateľom, ktorý túto hodnotu stanovil na základe testovania a vybral hodnotu, ktorá najlepšie delí snímok na objekt snímky a jeho pozadie. Častejšie sa však využívajú automatické metódy určovania prahu, ktoré využívajú na výpočet prahu napríklad histogram, percentuálny odhad veľkosti objektu snímku či medián snímku. Vo väčšine prípadoch nie je jedna prahová hodnota postačujúca. Ide predovšetkým o snímky, ktoré nemajú na celej ploche zhodné jasové podmienky. V takomto prípade sa využíva adaptívne prahovanie, ktoré prah nevytvára globálne, ale počíta s rozdielnymi jasovými hodnotami v rôznych častiach snímku. Prah T je pri adaptívnom prahovaní určený na základe informácií z okolia každého bodu [11]. Prahovanie popisuje vzťah 4.3, v ktorom $f(i, j)$ predstavuje vstupný snímok a $h(i, j)$ výstupný snímok.

$$h(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{pre } f(i, j) \geq T \\ 0 & \text{pre } f(i, j) < T \end{cases} \quad (4.3)$$

4.3.1 Globálne prahovanie

Globálne prahovanie je ten typ prahovania, ktorý prahuje celý obrázok len za pomoci jedinej hodnoty prahu [15]. Existuje niekoľko metód pre nájdenie globálneho prahu.

Metóda p-podielu

Metóda p-podielu je jednou z prvých metód prahovania. V tejto metóde sa predpokladá, že obrázok pozostáva z tmavých objektov na svetlom pozadí. Za predpokladu, že percento plochy objektu poznáme, je prahová hodnota definovaná ako najvyššia úroveň šedej, ktorá však mapuje aspoň $(100 - p) \%$ z pixelov objektu v naprahovanom obrázku. Táto metóda však nie je použiteľná pre obrázky, v ktorých nie je známa oblasť objektu.

OTSU prahovanie

Metóda optimálneho prahovania je založená na aproximácii histogramu obrazu určeného na segmentáciu pomocou váhovaného súčtu dvoch alebo viacerých hustôt pravdepodobnosti normálneho rozdelenia. Prah je potom stanovený ako najbližšia úroveň šedej zodpovedajúca minimálnej pravdepodobnosti maxima medzi dvoma alebo viacerými normálnymi rozdeleniami.

Toto prahovanie sa považuje za prahovanie, ktoré vedie k minimálnej chybe dosiahnutej pri segmentovaní. To znamená, že minimálny počet obrazových bodov je nesprávne segmentovaných [16], [35].

4.3.2 Lokálne prahovanie

Mnohokrát sa stáva, že globálny prah nepostačuje pre dostatočné výsledky segmentácie na celom obrázku. Tak isto je veľmi náročné určiť jediný prah, za pomoci ktorého je možné správne segmentovať väčší súbor obrázkov.

Lokálne prahy je možné určiť rozdelením obrázka do niekoľkých podobrazov a výpočtom prahov pre každý podobraz alebo preskúmaním intenzít obrazu v okolí každého pixelu [15].

Prvý spôsob spočíva v tom, že sa obraz prvotne rozdelí na obdĺžnikové prekrývajúce sa obrazy. Následne sa vytvoria histogramy pre každú z týchto častí. Je veľmi dôležité, aby boli obdĺžniky dostatočne veľké, aby obsahovali obrazové body objektu a pozadia. V prípade, že má daný obdĺžnik bimodálny histogram, prah zodpovedá minimu, ktoré sa nachádza medzi vrcholmi histogramu. Ak má obdĺžnik unimodálny histogram, prah možno priradiť interpoláciou z prahov nájdených v blízkych obdĺžnikoch. V poslednom kroku je potrebná druhá interpolácia, aby sa našli správne prahy pre každý pixel [27].

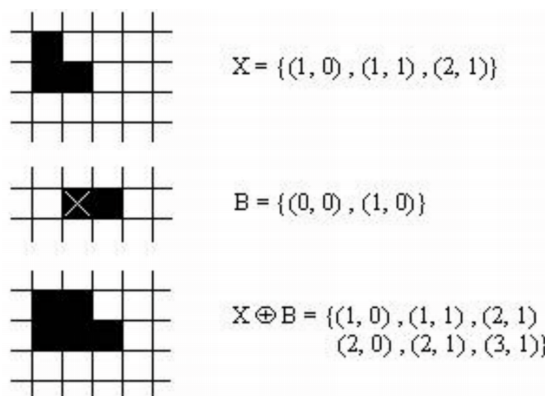
Druhý spôsob určovania lokálneho prahu využíva štatistickejšie metódy akými sú stredná hodnota distribúcie lokálnej intenzity, štandardná odchýlka, priemer minimálnej a maximálnej hodnoty či štatistika založená na veľkosti gradientu miestnej intenzity [16], [35].

4.4 Morfologické operácie

Morfologické operácie sú operácie, ktoré sú založené na vlastnostiach bodových množín a ich relácií. V prípade morfologických operácií máme k dispozícii obraz X a menšiu bodovú množinu B . B , nazývaná aj ako štrukturálny element, sa systematicky posúva po obraze X a výsledok tejto transformácie je postupne zapisovaný do binárneho obrazu. Medzi dve základné operácie, ktoré fungujú týmto spôsobom, patrí erózia a dilatácia [17].

Dilatácia

Dilatácia je operácia, ktorá skladá body dvoch množín za pomoci vektorového súčtu. Hlavnou úlohou dilatácie je zaplňovanie dier, či zálivov v objekte. Po aplikácii sú objekty zväčšené na úkor pozadia [12], [25]. Pre pochopenie princípu dilatácie je priložený príklad jednoduchšej dilatácie, obr. 4.3.

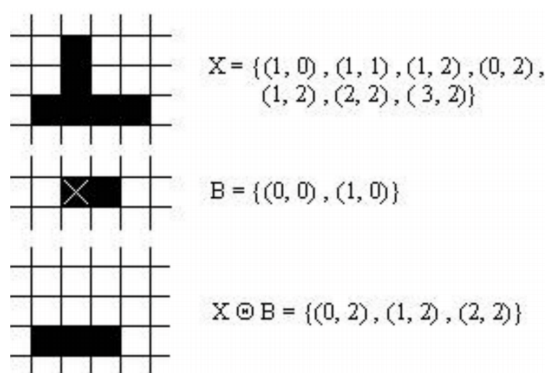


Obr. 4.3: Princíp dilatácie na jednoduchom príklade.

Erózia

Erózia je operácia, ktorá skladá dve množiny za pomoci vektorového rozdielu. Hlavnou úlohou erózie je zjednodušenie zložitej štruktúry obrázku. Objekty obrázku, ktoré sú veľmi tenké po aplikovaní erózie zmiznú. Tie veľmi zložité budú rozložené na jednoduchšie [12], [25].

Pre pochopenie princípu erózie je priložený príklad jednoduchšej erózie, obr. 4.4.



Obr. 4.4: Princíp erózie na jednoduchom príklade.

Otvorenie

Ide o morfológickú operáciu, ktorá využíva kombináciu dilatácie a erózie. Vzhľadom k tomu, že tieto dve operácie nie sú inverzné, môžeme povedať, že otvorenie je erózia, za ktorou bezprostredne nasleduje dilatácia. Výsledkom tejto operácie je narušenie malých a tenkých spojov medzi objektami a zväčšenie medzery medzi týmito objektami [34], [17].

Uzavretie

Uzavretie je morfológická operácia, kde ide taktiež o kombináciu erózie a dilatácie akurát v opačnom poradí. Je to teda sled aplikácie dilatácie, za ktorou bezprostredne nasleduje erózia. Výsledkom operácie je spojenie objektov nachádzajúcich sa blízko seba a zaplnenie dier nachádzajúcich sa v objektoch [34], [17].

4.5 Hranovo orientovaná detekcia

Hranovo orientovaná detekcia je detekcia, ktorá funguje za pomoci hranových detektorov. Samotné hľadanie hrán vychádza z toho, že intenzita jednotlivých pixelov sa rapídne zmení na hranách dvoch regiónov.

Detekcia hrany je založená na vyhodnotení rýchlosti zmeny intenzity v rámci okolia pixelu. Rýchlosť je charakterizovaná veľkosťou gradientu.

Existuje niekoľko metód na hranovú detekciu. Tieto metódy sú radené do dvoch základných skupín. Prvou skupinou je skupina metód, ktoré využívajú prvú deriváciu obrazovej funkcie. Druhá skupina metód pri segmentácii hrán využíva druhú deriváciu obrazovej funkcie. Existujú však aj detektory, ktoré využívajú kombinovanú formu hranovej detekcie, [1], [35].

4.5.1 Operátory využívajúce prvú deriváciu

Operátory, ktoré využívajú prvú deriváciu obrazovej funkcie porovnávajú veľkosť gradientu s hodnotou prahu. Pokiaľ je veľkosť gradientu vyššia ako hodnota prahu, ide o hranu. V opačnom prípade o hranu nejde [7], [35].

Gradient predstavuje vektor, ktorý v každom bode určuje smer najrýchlejšieho rastu danej funkcie. V súradnicovom vyjadrení je v danom mieste gradientom vektor, ktorého zložky tvoria jednotlivé parciálne derivácie funkcie. Parciálne derivácie sú následne aproximované diferenciami, ktoré je možné vypočítať na základe konvolučných masiek.

V praxi sa často využíva aj výpočet parciálnych derivácií osobitne pre riadky a osobitne pre stĺpce. Pre výpočet veľkosti gradientu je potrebné použiť vzťah 4.4:

$$G(i, j) = \sqrt{G_1(i, j)^2 + G_2(i, j)^2} \quad (4.4)$$

kde G je výsledná veľkosť gradientu, G_1 je parciálna derivácia riadkov, G_2 parciálna derivácia stĺpcov.

Jednotlivé hranové operátory sa líšia konvolučnou maskou. Maska určuje body, ktoré sú použité na výpočet veľkosti gradientu. Samotný výsledok veľmi ovplyvňujú hodnoty použité v maske, ale aj veľkosť masky, ktorá má vplyv predovšetkým na citlivosť na šum [17].

Typy takýchto hranových operátorov

Významné hranové operátory [35] fungujúce na princípe prvej derivácie a ich konvolučné masky pre výpočet gradientu riadkov (h_1) a stĺpcov (h_2) :

- Robertsov hranový operátor

$$h_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, h_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

- Sobelov hranový operátor

$$h_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, h_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

- Prewittovej hranový operátor

$$h_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, h_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

- Kirschov hranový operátor

$$h_1 = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 \\ 3 & 0 & 3 \\ -5 & -5 & -5 \end{bmatrix}, h_2 = \begin{bmatrix} -5 & 3 & 3 \\ -5 & 0 & 3 \\ -5 & 3 & 3 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

4.5.2 Operátory využívajúce druhú deriváciu

Ide o operátory, ktoré využívajú pre detekciu druhú deriváciu obrazovej funkcie. Tieto metódy detekujú hrany v takom prípade, ak je zmena polaritý druhej derivácie významnou zmenou. Tieto operátory teda počítajú počet uskutočnených prechodov nulou [35], [17] .

Typy takýchto hranových operátorov

- Laplaceov hranový operátor - konvolučné masky pre okolie 4 (h_1) a 8 (h_2)

$$h_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, h_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

- Laplacian of Gaussian (LoG) operátor - konvolučná maska LoG, rozmer 5 x 5

$$h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ -1 & -2 & 16 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

4.5.3 Cannyho hranový detektor

Jedným z pokročilejších hranových detektorov je Cannyho detektor. Nejde o jeden konkrétny detektor ako boli Sobelov či Laplaceov, ale o viacero na seba naväzujúcich krokov. Tento detektor hrán zaisťuje dobrú odolnosť voči šumu. Detekuje skutočné okrajové body s minimálnou chybou.

Kroky potrebné pri použití Cannyho detektoru

- eliminácia šumu použitím Gaussovho filtru,
- detekcia hrán použitím niektorého z detektorov vo všetkých smeroch (horizontálne aj vertikálne),
- výpočet veľkosti gradientu v obraze,
- určenie smeru hrany v každom bode,
- potlačenie pixelov, ktoré nie su hranové,
- prahovanie a hystereza [17].

4.5.4 Houghova transformácia

Houghova transformácia je metóda radená do hranovo orientovaných segmentačných metód. Je využívaná na parametrické nájdenie objektov v obraze. Pôvodne bola využívaná na hľadanie priamiek, no modifikácia zabezpečila, že pomocou tejto metódy dokážeme dnes detekovať celú škálu útvarov v danom obraze. Z toho vyplýva, že nie je určená na segmentáciu celého objektu, ale skôr na segmentáciu časti objektov, ktoré je možné popísať rovnicou (priamka, kruh, elipsa) [34].

4.6 Region growing - semienková metóda

Region growing metóda je jednou zo segmentačných metód, ktoré sa nazývajú dynamickými. Prvým a základným krokom je zvolenie počiatočných bodov nazývaných semienka. V nasledujúcom kroku je potrebné skúmať okolité body tohto semienka. V prípade, kedy skúmaný susedný pixel vyhovuje daným semienkam, zaradíme tento pixel do regiónu a táto hodnota sa stane východnou hodnotou pre nasledujúci cyklus algoritmu. Algoritmus opakuje tento postup do momentu, kedy už v okolí neexistujú body, ktoré zodpovedajú podmienkam oblasti regiónu. Ide teda o iteratívny proces. Medzi spomínané podmienky patria napríklad hodnota jasu, či farba [5]. Nasledujúci vzťah 4.11 matematicky popisuje pixel, ktorý je vhodný na to, aby spadol do regiónu:

$$|p_s - p_j| \leq T \quad (4.11)$$

kde p_s je hodnota či už jasu alebo farby zodpovedajúca semienku, p_j hodnota zodpovedajúca testovanému pixelu a T je prah.

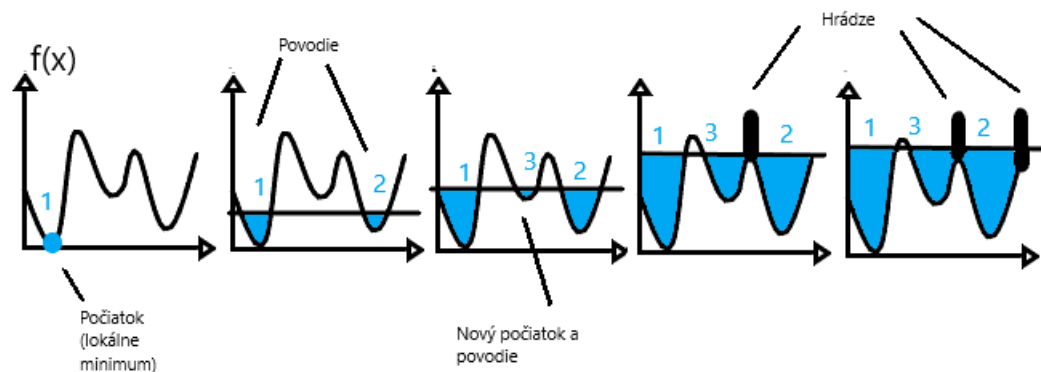
4.7 Watershed - metóda rozvodí

Ide o metódu segmentácie, ktorá je na pomedzí hranovo a regiónovo orientovaných segmentačných metód. Metóda popisuje obraz ako reliéf terénu, kde vrcholy zodpovedajú maximálnym hodnotám jasu v obraze.

Metódu watershed nie je vhodné používať na pôvodný obraz, preto sa vytvára obraz parametrický za pomoci operátorov aproximujúcich prvú deriváciu diferenciami. Výsledný segmentovaný obraz potom pozostáva z povodí a rozvodí. Povodia zodpovedajú jednotlivým segmentom a rozvodia hraniciam segmentov.

Predstava funkcie metódy vychádza zo simulácie povodne, obr. 4.5. Na dne reliéfu sa nachádzajú najnižšie položené miesta, lokálne minimá. V miestach lokálnych miním sa do reliéfu navráťajú otvory, cez ktoré do reliéfu priteká voda. Jednotlivé oblasti sa tak plnia vodou. V mieste, kde dôjde k stretu vôd dvoch oblastí vznikne hrádza. Hrádza predstavuje rozvodie, hranicu dvoch segmentov.

Výhodou metódy je jej robustnosť a teda odolnosť voči šumu. Je to však metóda, ktorá vyžaduje vznik vhodného parametrického obrazu. V niektorých prípadoch dochádza k presegmentovaniu obrazu, preto je potrebné po segmentácii niektoré oblasti rozvodia spojiť. Spájajú sa falošne vytvorené malé oblasti do väčších celkov [35], [30].



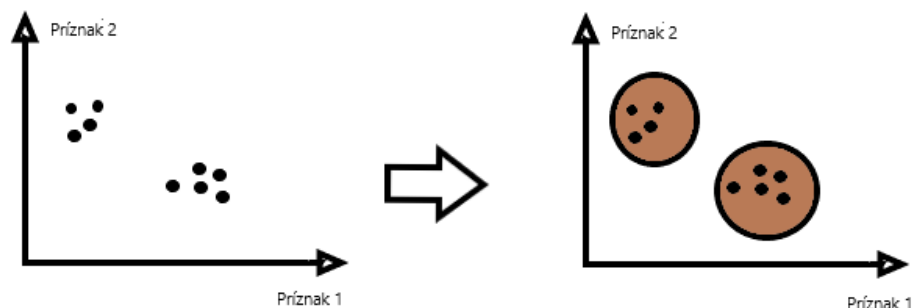
Obr. 4.5: Simulácia princípu metódy rozvodí - watershed.

4.8 Zhlučovacie metódy segmentácie

Zhlukovanie, obr. 4.6, je metodický postup, ktorého podstatou je hľadanie určitých súvislostí v obraze ako v celku. Každý jeden bod (pixel) obrazu je priradený k určitému bodu, nazývanému centroid, na základe rozdielnosti či podobnosti. Centroid je chápaný ako geometrický stred skupiny objektov. Takto priradené body vytvárajú skupinu, ktorá sa nazýva zhluk. Zhluk je teda možné definovať ako skupinu objektov, ktoré majú podobné vlastností [22]. Pred samotnou analýzou je potrebné definovať charakteristické črty jednotlivých bodov (príznakov). Zhlučovanie sa potom realizuje na základe týchto príznakov.

Podľa spôsobu organizácie sa vo všeobecnosti zhlučovanie delí nasledovne:

- hierarchické zhlučovanie - takýto typ zhlučovania vytvára systém zhlukov, ktoré sú jeden k druhému vo vzťahu vytvárajúcom hierarchiu. Zhluky vytvárajú množinu, ktorá obsahuje podmnožiny.
- nehierarchické zhlučovanie - takýto typ zhlučovania vytvára systém zhlukov, ktoré nie sú jeden k druhému v hierarchickom vzťahu.



Obr. 4.6: Jednoduchý príklad zhlučovania [20].

4.8.1 K-means

Jednou z najjednoduchších a najviac používaných zhlukovacích metód nehierarchického zhlukovania je metóda k-means. Rieši problém rozdelenia n-dimenzionálnych vektorov a ich príslušnosť do homogénnych zhlukov [35].

Algoritmus k-means pozostáva z niekoľkých krokov:

1. určenie výsledného počtu zhlukov k ,
2. úvodný výber centroidov v počte k a ich rozmiestnenie,
3. pridelenie jednotlivých vektorov k centroidom na základe najmensej euklidovskej vzdialenosti,
4. výpočet nového centroidu prostredníctvom výpočtu aritmetického priemeru priradených vektorov,
5. iteratívne opakovanie od bodu 3 pokiaľ dochádza k zmene v rámci zhlukov, inak koniec.

Výpočet euklidovskej vzdialenosti 4.12:

$$d_{(A,B)} = \sqrt{(A_x - B_x)^2 + (A_y - B_y)^2} \quad (4.12)$$

kde $d_{(A,B)}$ je vzdialenosť jedného objektu od centroidu, A_x a A_y sú súradnice centroidu, B_x a B_y sú súradnice objektu.

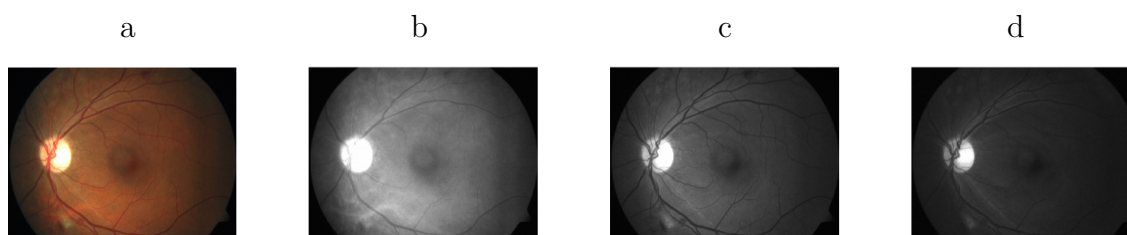
5 Návrh programového riešenia

Obsahom tejto kapitoly je navrhnutý postup detekcie útvarov, ktoré sú príznakmi prítomnosti diabetickej retinopatie na snímkach sietnice ľudského oka. Vzhľadom k tomu, že sietnica obsahuje aj množstvo iných útvarov než sú útvary patologické, je potrebné pre zvýšenie presnosti tohto algoritmu útvary vopred detekovať a následne ich zo snímky odstrániť. Medzi spomínané útvary patrí optický disk a krvné riečisko. Po ich odstránení zo snímky je možné presnejšie detekovať útvary, ktoré sú patologické (mikroaneuryzmy, exudáty, hemorágie).

5.1 Predspracovanie

Keďže nie všetky snímky očnej sietnice získané prostredníctvom fundus kamery majú ideálny kontrast a kvalitu, je potrebné pre úspešnú detekciu tieto snímky kvalitne predspracovať.

Pôvodne získaný snímok z fundus kamery je snímok farebný, ktorý neposkytuje úplne vhodné podmienky na ďalšiu prácu s ním, preto bol zo snímku extrahovaný zelený kanál, ktorý poskytuje najlepší kontrast jednotlivých častí sietnice a preto je najvhodnejší pre nasledujúcu prácu s ním, obr. 5.1.



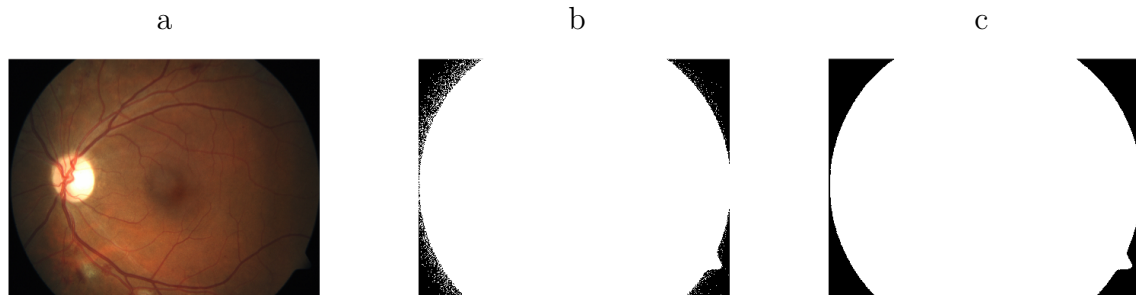
Obr. 5.1: Rozloženie snímku na farebné kanály: a) pôvodný farebný snímok sietnice, b) červený kanál snímku, c) zelený kanál snímku, d) modrý kanál snímku.

Extrahovaný zelený kanál obsahoval najlepší kontrast spomedzi všetkých kanálov, avšak experimentálne bolo zistené, že bola potrebná ešte dodatočná úprava kontrastu za pomoci ekvalizácie histogramu.

Snímky očnej sietnice získané z fundus kamery obsahujú dve základné viditeľné oblasti. Ide o oblasť pozadia a oblasť samotnej sietnice. Vzhľadom k uľahčeniu následného spracovania snímku, je vítané odlíšiť oblasť pozadia a sietnice a tak vytvoriť masku pozadia, obr. 5.2. Maska vznikla aplikáciou dvoch krokov. Ako prvý bol snímok prahovaný. Prah bol nastavený na pevnú hodnotu 20, ktorá bola zistená experimentálne. Prahovaním bolo dosiahnuté, že pixelom zodpovedajúcim pozadiu bola pridelená hodnota 0. U snímok, ktoré neboli dobre osvetlené, sa po prahovaní

objavili v oblasti pozadia izolované pixely. Tieto pixely boli odstránené druhým krokom k získaniu masky a to použitím morfolologickej operácie - erózie. Štrukturálnym elementom použitým v erózií izolovaných pixelov bol disk o polomere 5.

Maska snímku bola využitá pre vyhladenie časti pozadia každého jedného snímku pre viditeľnejšie oddelenie oblasti pozadia a sietnice pred ďalším spracovaním. Izolované pixely v oblasti pozadia spôsobovali v tomto spracovaní problémy.



Obr. 5.2: Vytvorenie masky pozadia: a) pôvodný snímok sietnice, b) maska pozadia s izolovanými pixelmi, c) maska pozadia po erózií.

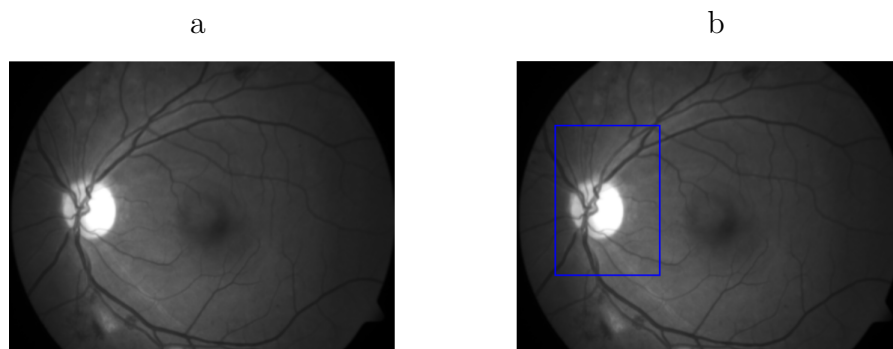
5.2 Detekcia optického disku

Exudáty sa nachádzajú v snímku s veľmi podobnou intenzitou, akú má na snímku optický disk. Podstatným rozdielom, ktorý zohráva úlohu v odlíšení optického disku a exudátu je veľkosť týchto dvoch elementov. Optický disk je na snímku viditeľný ako väčší útvar, zatiaľ čo exudáty sú omnoho menších rozmerov. To je dôvod, prečo je viac než žiadané optický disk lokalizovať a následne ho pred samotnou detekciou patológií zo snímku odstrániť. Tým sa zabezpečí presnejšia a rýchlejšia detekcia hľadaných patologických útvarov. Pri samotnej detekcii boli niektoré aplikácie v rámci správneho vyhľadania optického disku čerpané z [31].

Celá detekcia optického disku prebiehala na zelenom kanáli snímku, vzhľadom k tomu, že tento kanál poskytuje najlepší kontrast pre odlíšenie disku a zvyšnej časti snímku. Na tento snímok bol prvotne aplikovaný Gaussov filter so sigmoidou, štandardnou odchýlkou, empiricky zvolenou na hodnotu 5. Aplikáciou filtra bolo dosiahnuté odstránenie šumu nachádzajúceho sa v snímku.

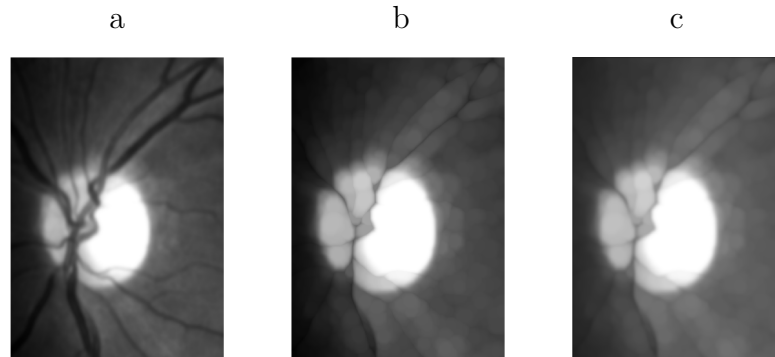
Pre nasledujúcu prácu so snímkom je potrebné zmenšiť oblasť vyhľadávania a detekcie optického disku na región záujmu (ROI). ROI je vyhľadávaný z pôvodného snímku nasledujúcim postupom. Z celej plochy pôvodného snímku je hľadaný pixel s maximálnou hodnotou. Tento pixel je považovaný za stred hľadaného ROI. S ohľadom na súradnice stredu ROI sa uskutoční v pôvodnom snímku výrez obdĺžnikového

tvaru o rozmeroch 700 x 999, obr. 5.3. Tento výrez je hľadaným ROI, v ktorom sa nachádza optický disk, ktorý bude v nájdenom ROI detekovaný.



Obr. 5.3: Hľadanie regiónu záujmu: a) Zelený kanál snímku po aplikácii Gaussovhovho filtru, b) rozmeraný ROI.

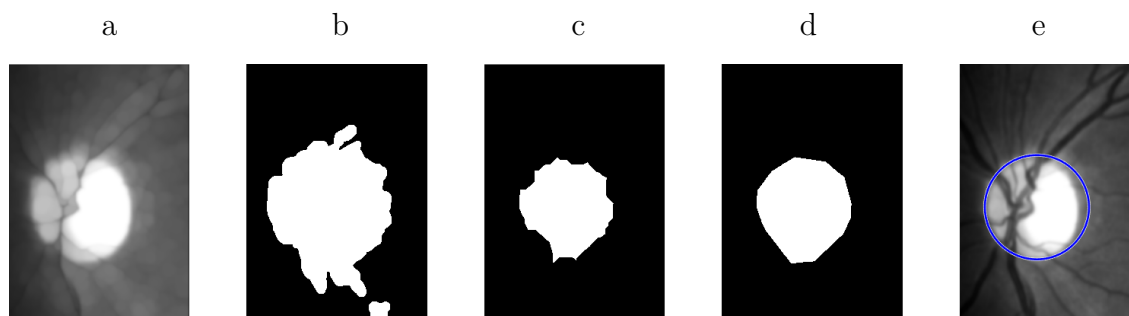
V ROI je potrebné viditeľnejšie oddeliť oblasť optického disku od okolia disku a ciev prechádzajúcich diskom. Pre potlačenie ciev je potrebné ROI dilatovať. Dilatáciou s diskovým tvarom štrukturálneho elementu o polomere 17 sa zúžia cievy a zjednotí sa oblasť disku. Na dilatovaný snímok sa napokon aplikuje priemerovací filter veľkosti 10, ktorý podporí zjednotenie oblasti disku, obr. 5.4.



Obr. 5.4: Úprava ROI: a) Výrez ROI, b) ROI po dilatácii, c) ROI po priemerovacej filtrácii.

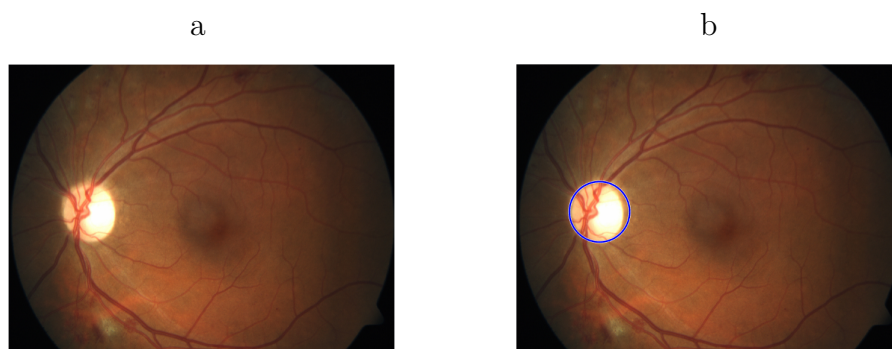
Takto upravený ROI bolo potrebné pre získanie samotného disku už len binarizovať. Pre binarizáciu bol zvolený prah na základe strednej hodnoty vyskytujúcej sa v snímku ROI. Keďže vytvorený binarizovaný snímok obsahoval pixely nepatriace oblasti optického disku, daný snímok prešiel ešte eróziou o veľkosti 55. Takáto morfológická úprava však vytvorila útvar, ktorý nemal úplne pravidelný a zjednotený okraj. Jeho zjednotenie bolo dosiahnuté vytvorením konvexnej obálky. Na základe

súradníc okrajových bodov takto získaného uceleného útvaru a jeho stredu sa vypočítal polomer optického disku. Následne bola kružnica predstavujúca optický disk zakreslená do pôvodného ROI, obr. 5.5.



Obr. 5.5: Vyhľadávanie optického disku v ROI: a) upravený ROI, b) binarizovaný ROI, c) binarizovaný ROI po otvorení a erózií, d) ROI po aplikácii konvexie, e) vyznačený nájdený optický disk v ROI.

Nájdený optický disk v rámci ROI je potrebné v poslednom kroku pre správnu lokalizáciu optického disku vyznačiť v pôvodnom snímku, obr. 5.6.



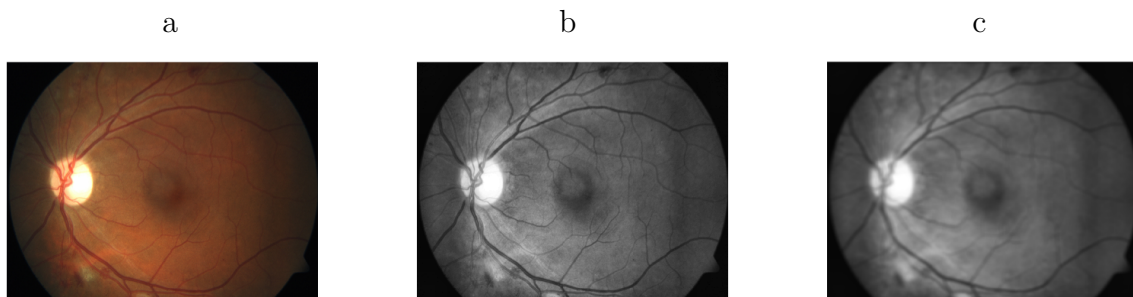
Obr. 5.6: a) pôvodný snímok sietnice, b) snímok sietnice s lokalizovaným optickým diskom.

5.3 Detekcia krvného riečiska

Ďalším dôležitým elementom vyskytujúcim sa v snímkoch očnej sietnice sú krvné cievy. Takéto krvné riečisko má na snímku získanom z fundus kamery sýtu červenú farbu. Práve farba je to, čo majú krvné cievy a patológie zvané mikroaneuryzmy spoločné. To je dôvod, prečo je dôležité krvné riečisko v snímku detekovať a pred detekciou patológií ho zo snímku odstrániť.

Detekcia prebiehala na šedotónovom snímku, ktorý bol získaný na základe analýzy hlavných komponent. Pred analýzou bol obrázok zmenšený.

Na takto prevedený šedotónový snímok bol aplikovaný algoritmus CLAHE, ktorého úlohou bolo zvýšenie kontrastu v rámci snímku, z dôvodu evidentnejšieho zvýraznenia krvných ciev. CLAHE bola použitá s experimentálne nastavenými parametrami, kde počet kusov, na ktoré sa obraz rozdelil, bol 8 s počtom 128 intervalov pre vytvorenie nového adaptívne obmedzeného histogramu. Následne bol na takto spracovaný snímok aplikovaný priemerovací filter o veľkosti 9 x 9. Filter bol aplikovaný za účelom potlačenia zvyšných útvarov v rámci snímku, ktoré by mohli predstavovať problém pri segmentácii, obr. 5.7.



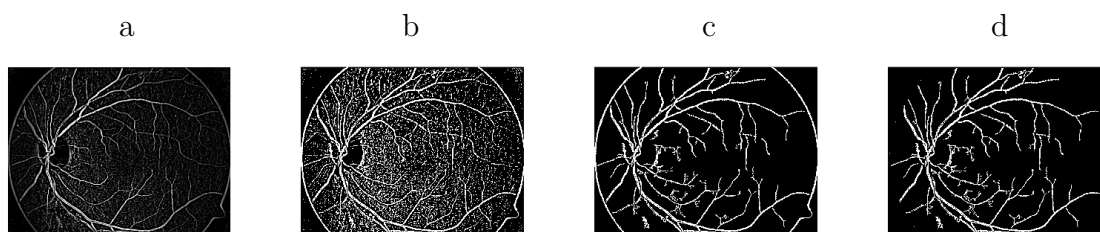
Obr. 5.7: Úprava snímku pred lokalizáciou krvného riečiska: a) pôvodný snímok sietnice, b) šedotónový snímok po aplikácii algoritmu CLAHE, c) snímok po aplikácii priemerovacieho filtra.

K úspešnému nájdeniu krvného riečiska bolo potrebné na takto spracovaný snímok implementovať niekoľko krokov. Prvým krokom k úspešnej segmentácii bolo získanie subtraktu, ktorý predstavoval rozdiel medzi snímkom po aplikácii CLAHE a snímkom po priemerujúcej filtrácii. Takéto spracovanie rozdielu dvoch snímkov je výhodným východiskom pre následné prahovanie vzhľadom k tomu, že sa v ňom nachádza vhodný pomer intenzity medzi hľadanými cievami a tkanivom sietnice a rozloženie kontrastu jednotlivých pixelov v rámci oboch týchto častí je rovnomerné.

Subtrakt bol prahovaný za pomoci adaptívneho OTSU prahovania. Prah, na základe ktorého bol snímok prahovaný, bol pre každý snímok unikátny. Prahovaním sa však k získaným cievam pridali aj malé objekty, ktoré cievam nepatrili. Odstránenie takýchto objektov bolo dosiahnuté aplikáciou morfolologickej operácie, ktorou boli odstránené binárne objekty o veľkosti menšej ako 150, inšpirované z [4].

Prahovaním bol zvýraznený obrys sietnice, ktorý bolo potrebné odstrániť. Konvúlcia snímku a masky pozadia však nebola dostatočná, preto bolo nutné pôvodnú masku pozadia jemne zväčšiť. Zväčšenie bolo dosiahnuté eróziou masky pozadia so štrukturálnym elementom v tvare disku o veľkosti 10. Násobením snímku a erodovanej masky bol odstránený obrys sietnice a tým získané finálne segmentované cievy,

obr. 5.8.



Obr. 5.8: Segmentácia krvných ciev: a) snímok predstavujúci rozdiel medzi snímkom po aplikácii CLAHE a snímkom po priemerovacej filtrácii, b) snímok po OTSU prahovaní obsahujúci malé objekty nepatriace cievam, c) naprahovaný snímok obsahujúci obrys pozadia, d) segmentované krvné riečisko.

5.4 Detekcia patologických útvarov

Po lokalizácii a vytvorení masky optického disku a ciev je možné prejsť k samotnej detekcii patologických útvarov. Vychádzajúc z predošlých kapitol je známe, že patologických prejavov diabetu mellitu na sietnici ľudského oka je viac. V rámci tejto práce boli detekované exudáty a mikroaneuryzmy.

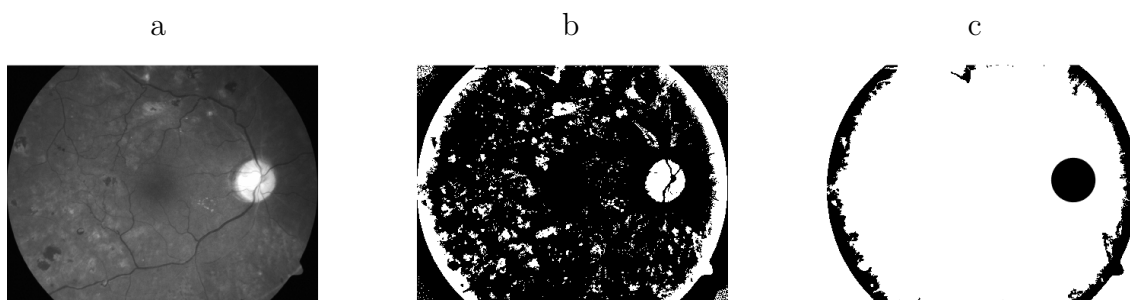
5.4.1 Detekcia exudátov

Exudáty sú známe ako látky tukového pôvodu usadzujúce sa na sietnici. Tie sú na snímku viditeľné ako žlté útvary s vysokou intenzitou a výraznými hranami. Ich počet, veľkosť a tvar na sietnici ľudského oka je individuálny.

Detekcia exudátov prebiehala v niekoľkých krokoch. Na celý proces bol opäť využitý zelený kanál pôvodného snímku. Šedotónový snímok bolo potrebné binarizovať. Prah zvolený na binarizáciu bol počítaný adaptívne, teda nešlo o jednu a tú istú hodnotu prahu pre celý snímok, ale prah bol vypočítavaný pre menší úsek. Parametre, ktoré boli zvolené, aby podporili správnu binarizáciu bola polarita základu snímku, ktorá bola stanovená na tmavú (kvôli výrazným exudátom bledej farby) a senzitivita binarizácie bola empiricky zvolená na hodnotu 0.8. Voľba takýchto parametrov poskytovala najlepšie výsledky v rámci binarizovaného snímku.

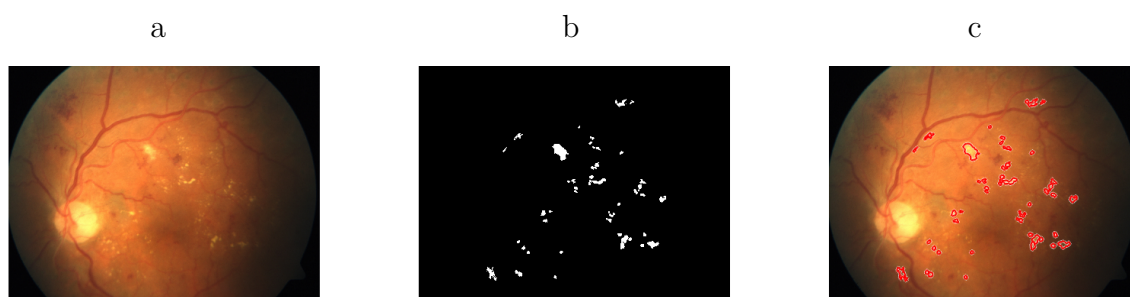
Po binarizácii snímku vznikol výrazný obrys sietnice, ktorý predstavoval pri ďalšej práci problém. To je dôvod, prečo bola vytvorená maska tohto obrysu a použitá na snímok pred ďalšou prácou s ním.

Maska obrysu, obr. 5.9, vznikla aplikáciou masky pozadia na binarizovaný snímok a vyplnením dier nachádzajúcich sa v snímku.



Obr. 5.9: Vytvorenie masky obrysu sietnice: a) zelený kanál pôvodného snímku, b) snímok sietnice po prahovaní, c) maska obrysu sietnice.

Samotná detekcia exudátov potom podliehala už len pár krokom. Princípom detekcie bolo využitie masiek útvarov, ktoré boli detekované v prechodných krokoch. Na prahovaný snímok zeleného kanála bola použitá maska disku, maska ciev, maska pozadia a maska obrysu sietnice. Násobením masiek a prahovaného obrázka bola týmto oblastiam pridelená hodnota 0. Po aplikácii boli obsahom daného snímku už len hľadané patologické útvary - exudáty, obr. 5.10.



Obr. 5.10: Detekcia exudátov: a) pôvodný snímok sietnice b) maska exudátov po násobení s maskou optického disku, maskou ciev, maskou pozadia, maskou obrysu sietnice a odstránení menších častí, nepatriacich exudátom, c) detekované exudáty.

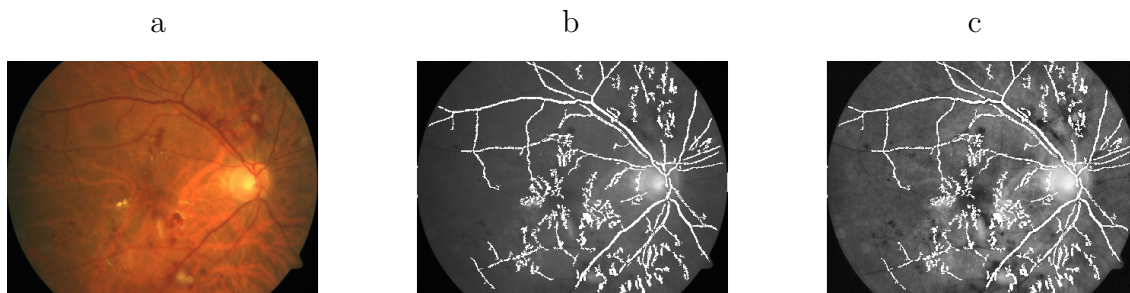
5.4.2 Detekcia mikroaneurizmov

Ďalšími významnými patologickými útvarmi, ktorých detekcia je pri diagnostike diabetickej retinopatie podstatná sú mikroaneurizmy. Na detekciu mikroaneurizmov bol použitý algoritmus, ktorý bol podobný tomu na detekciu exudátov s malými rozdielmi.

Keďže na rozdiel od exudátov majú mikroaneurizmy na snímku tmavočervenú farbu, bolo potrebné sa zamerať na najtmavšie útvary v snímku. Vzhľadom k tomu, že rovnako ako mikroaneurizmy aj cievy sú charakteristické svojou tmavou farbou,

bolo potrebné cievy zo snímku odstrániť, aby nepredstavovali pri detekcii mikroaneuryzmov problém. Takéto odstránenie oblasti ciev bolo dosiahnuté konvolúciou masky ciev a šedotónového snímku získaného zo zeleného kanála pôvodného snímku.

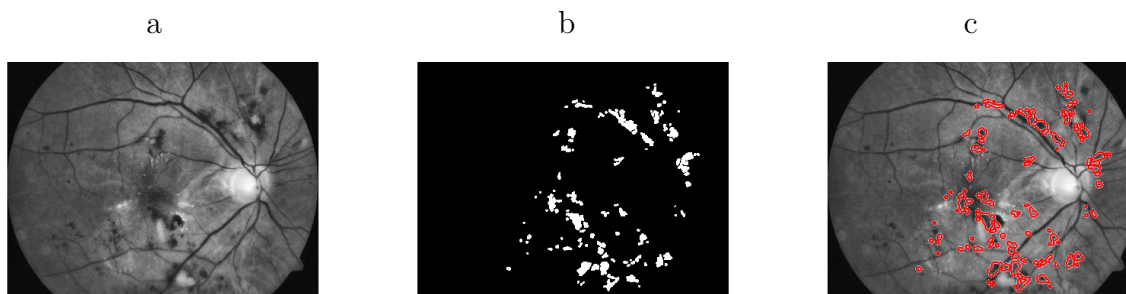
Experimentálne však bolo zistené, že kontrast zeleného kanála v tomto prípade nepostačoval. Za účelom zvýšenia kontrastu na požadovanú úroveň bol na snímok aplikovaný algoritmus CLAHE, obr. 5.11.



Obr. 5.11: Predspracovanie pred detekciou mikroaneuryzmov: a) pôvodný snímok sietnice b) zelený kanál snímku sietnice po aplikácii masky ciev, c) snímok b po aplikácii CLAHE algoritmu.

Snímok po aplikácii algoritmu CLAHE bol prahovaný za pomoci adaptívneho prahu s empiricky zvolenou hodnotou senzitivity 0,9. V naprahovanom snímku boli opäť viditeľné malé objekty rôznych tvarov, ktoré nezodpovedali hľadaným patológiám - mikroaneuryzmom. Útvary boli odstránené aplikáciou erózie so štrukturálnym elementom v tvare disku o polomere 5. Hodnota veľkosti štrukturálneho elementu bola zvolená experimentálne.

Posledným krokom bola aplikácia dilatácie o veľkosti 10, ktorá zabezpečila zjednotenie okrajov nájdených útvarov patriacich k hľadaným mikroaneuryzmom, obr. 5.12.

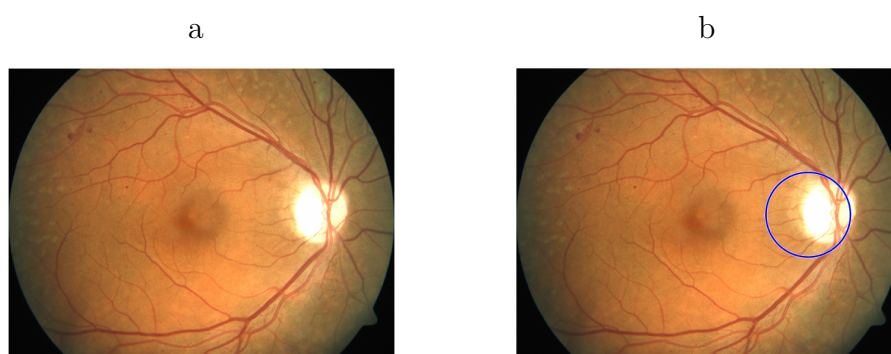


Obr. 5.12: Detekcia mikroaneuryzmov: a) snímok získaný zo zeleného kanála po aplikácii CLAHE b) maska mikroaneuryzmov, c) detekované mikroaneurizmy v snímku po aplikácii CLAHE z dôvodu lepšieho rozlíšenia.

5.5 Nesprávna detekcia útvarov

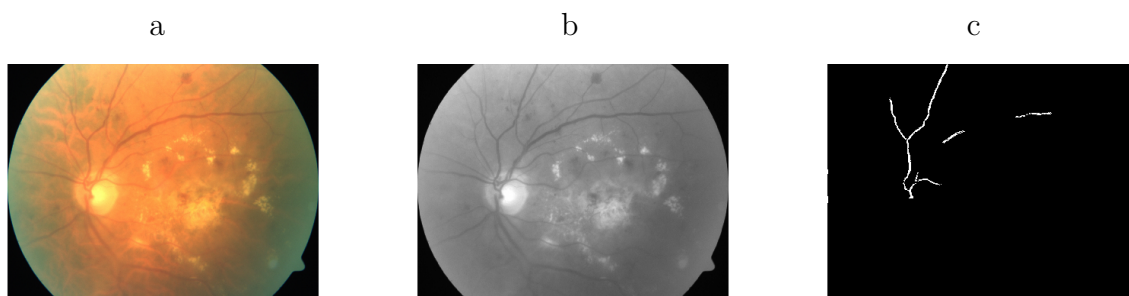
Aj keď bol navrhnutý program experimentálne upravovaný tak, aby dosiahol čo najlepších výsledkov, u niektorých snímkov dochádzalo k nesprávnej detekcii. Za nesprávnu detekciu boli často zodpovedné jas či kontrast daného snímku, svetlé miesta sietnice nepatriace detekovaným útvarom či nie vysoká kvalita samotného snímku.

U niektorých snímkov bol prítomný problém pri detekcii optického disku, kedy bol detekovaný disk vzhľadom k skutočnej lokalizácii disku posunutý. Tým bola ako disk označená malá časť sietnice, ktorá nezodpovedala disku a naopak malá časť zodpovedajúca disku nebola za disk označená, obr. 5.13. Takýto posun bol zaznamenaný v dôsledku vysokého jas okolia disku.



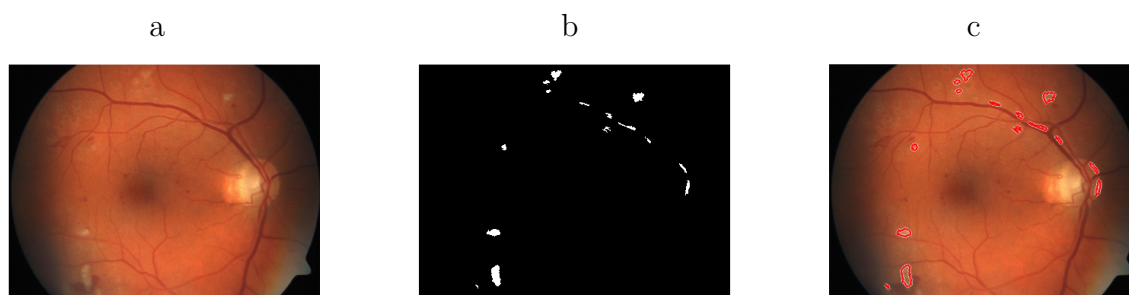
Obr. 5.13: Nesprávna detekcia optického disku: a) pôvodný snímok sietnice, b) pôvodný snímok sietnice s vyznačeným detekovaným diskom.

Pri detekcii krvných ciev bol zaznamenaný častý problém u snímkov, ktorých jas neposkytoval v určitých oblastiach dobrej úrovne. Keďže je krvné riečisko charakteristické tmavou farbou na snímku, v oblastiach nízkeho jas bolo toto riečisko nedetekovateľné ani po niekoľkonásobných úpravách jas analyzovaného snímku, obr. 5.14.



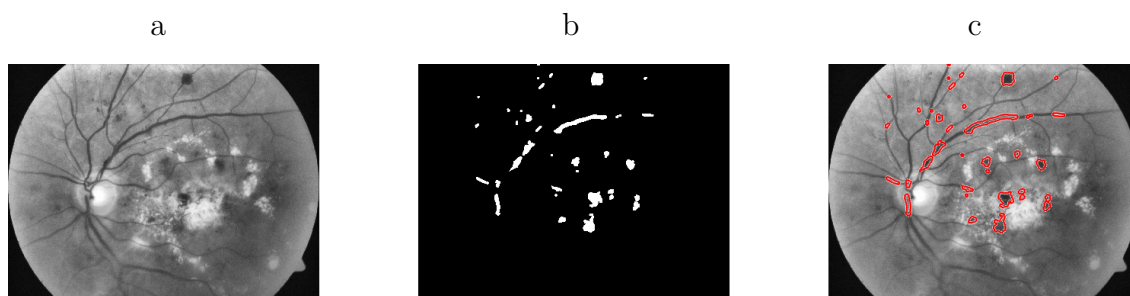
Obr. 5.14: Nesprávna detekcia cievneho riečiska: a) pôvodný snímok sietnice, b) zelený kanál pôvodného snímku, c) nesprávne detekované cievy.

Oblasť, ktorá bola považovaná za najväčší problém pri detekcii exudátov bola oblasť v okolí krvných ciev. V okolí ciev sa totiž nachádzajú oblasti s vyšším jasom a tie boli často radené k detekovaným exudátom, čo nebolo správne, obr. 5.15. Experimentálne bolo podložené, že tieto miesta by mohli byť odstránené dilatáciou masky krvného riečiska, avšak takáto dilatácia by mohla odstrániť aj skutočné exudáty lokalizované v blízkosti krvného riečiska.



Obr. 5.15: Nesprávna detekcia exudátov: a) pôvodný snímok sietnice, b) maska exudátov, c) nesprávne detekované exudáty.

Častým problémom vyskytujúcim sa pri detekcii mikroaneurizmov bola detekcia mikroaneurizmov na miestach krvných ciev. Keďže mikroaneurizmy sú na snímku charakteristické svojou tmavou farbou rovnako ako krvné cievy, sú závislé na ich predošlej segmentácii. V momente, kedy je čo i len malý kúsok okraja krvnej cievy v procese segmentácie krvného riečiska vynechaný, vzniká potenciálna oblasť následnej nesprávnej detekcie mikroaneurizmov, obr. 5.16.



Obr. 5.16: Nesprávna detekcia mikroaneuryzmov: a) snímok získaný zo zeleného kanála po aplikácii CLAHE, b) maska mikroaneuryzmov, c) nesprávne detekované mikroaneuryzmy.

6 Testovanie a dosiahnuté výsledky

K testovaniu navrhnutého programového riešenia boli použité snímky z databázy poskytnutej k zadaniu práce. Táto databáza obsahovala 250 farebných snímok sietnice ľudského oka získaných prostredníctvom fundus kamery, ktoré však neboli validované. Niektoré spomedzi snímok boli snímky zdravej sietnice ľudského oka, iné obsahovali mikroaneuryzmy či exudáty. Snímky nachádzajúce sa v poskytnutej databáze boli vo formáte .tif s rozlíšením 1958 x 2588 pixelov.

Vyhodnocovanie úspešnosti detekcie a lokalizácie jednotlivých útvarov bolo vykonané niekoľkými spôsobmi. Zatiaľ čo u optického disku bola úspešnosť vyhodnotená subjektívnym rozhodnutím či je detekcia správna, u ciev a patológií bola úspešnosť vyhodnotená kvantitatívne pomocou manuálne vytvorenej masky.

Diceov koeficient podobnosti

Pre výpočet Diceovho koeficientu podobnosti (DSC) sa berie v úvahu presnosť a citlivosť testu. Presnosť testu predstavuje pomer správne zvolených prvkov k celkovému počtu prvkov. Citlivosť udáva koľko percent prvkov je relevantných. Diceov koeficient podobnosti nadobúda hodnoty v rozmedzí 0 - 1, kde 1 predstavuje úplnú presnosť [36].

Vzorec vyjadrujúci DSC za pomoci množín X a Y , 6.1:

$$DSC(X, Y) = \frac{2|X \cap Y|}{|X| + |Y|} \quad (6.1)$$

Vzorec vyjadrujúci DSC možno prepísať aj nasledujúcim spôsobom, 6.2, kde TP sú správne detekované útvary, FP falošne detekované útvary a FN sú skutočné útvary, ktoré neboli detekované:

$$DSC = \frac{2TP}{2TP + FN + FP} \quad (6.2)$$

Senzitivita

Senzitivita testu je skôr známa ako citlivosť testu. Vyjadruje úspešnosť, s ktorou test zachytí prítomnosť sledovaného ochorenia u daného subjektu. Senzitivita nadobúda hodnoty v rozmedzí 0 - 1, [24].

Vzorec vyjadrujúci senzitivitu testu, 6.3:

$$Senzitivita = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6.3)$$

Pozitívna prediktívna hodnota (PPH)

Pozitívna prediktívna hodnota je ukazateľom, ktorý je definovaný za pomoci podmienenej pravdepodobnosti. PPH je pravdepodobnosť, že snímok naozaj obsahuje hľadané útvary v prípade, že test výjde pozitívne, [24].

Vzorec vyjadrujúci PPH, 6.4:

$$PPH = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6.4)$$

6.1 Dosiahnuté výsledky lokalizácie optického disku

Vzhľadom k tomu, že optický disk je v snímku len jeden a je jasne odlíšiteľný od ostatných útvarov, vyhodnotenie správnej detekcie prebiehalo subjektívne a to porovnaním si pôvodného snímku a snímku s detekovaným optickým diskom. Dosiahnuté výsledky lokalizácie optického disku sú uvedené v tabuľke 6.1.

Tab. 6.1: Úspešnosť lokalizácie optického disku.

Celkový počet	Správna lokalizácia	Nesprávna lokalizácia	Úspešnosť
250	229	21	91,6 %

6.2 Dosiahnuté výsledky segmentácie krvného riečiska

Vyhodnotenie úspešnosti lokalizácie krvného riečiska bolo vykonané pomocou Diceovho koeficientu podobnosti. Keďže snímky z prístupnej databázy neboli žiadnym spôsobom validované, bolo potrebné na vyhodnotenie podobnosti získať masky ciev iným spôsobom a tieto nové masky porovnať s maskami získanými prostredníctvom navrhnutého algoritmu. Nové masky boli získané manuálnym vyznačením ciev v danom snímku. Na základe takto získanej masky a masky získanej z navrhnutého algoritmu bol vypočítaný Diceov koeficient podobnosti, senzitivita a PPH. Tie predstavovali úspešnosť segmentácie krvných ciev v danom snímku. Úspešnosť segmentácie krvného riečiska na piatich náhodne vybraných snímkoch z databázy je uvedená v tabuľke, 6.2.

Tab. 6.2: Úspešnosť segmentácie krvného riečiska.

Snímky	1	2	3	4	5	Priemer
Senzitivita	0,627	0,776	0,688	0,676	0,772	0,708
PPH	0,661	0,678	0,669	0,700	0,747	0,691
Diceov koeficient	0,699	0,825	0,771	0,629	0,746	0,734

6.3 Dosiahnuté výsledky detekcie exudátov

Pre vyhodnotenie úspešnosti detekcie exudátov bol opäť použitý Diceov koeficient, senzitivita a PPH. Opäť však bolo potrebné pred samotným výpočtom získať masku exudátov, ktorá bola vytvorená manuálne. Potom boli porovnávané masky exudátov získané z vytvoreného algoritmu a masky vytvorené manuálne. Na základe tohto prekryvu boli získané hodnoty TP, FP a FN. Tie boli použité na výpočet všetkých troch veličín. Hodnoty Diceovho koeficientu podobnosti, senzitivity a PPH piatich náhodne vybraných snímkov z databázy sú uvedené v tabuľke, 6.3.

Tab. 6.3: Úspešnosť detekcie exudátov.

Snímky	1	2	3	4	5	Priemer
Senzitivita	0,525	0,682	0,693	0,715	0,623	0,648
PPH	0,690	0,609	0,643	0,695	0,653	0,658
Diceov koeficient	0,691	0,791	0,839	0,897	0,782	0,800

6.4 Dosiahnuté výsledky detekcie mikroaneurizmov

Úspešnosť detekcie mikroaneurizmov bola testovaná rovnakým spôsobom ako boli testované exudáty. Bol vypočítaný Diceov koeficient podobnosti, senzitivita a nakoniec PPH. Hodnoty všetkých veličín pri testovaní piatich náhodne vybraných snímok sú zapísané v tabuľke, 6.4.

Tab. 6.4: Úspešnosť detekcie mikroaneurizmov.

Snímky	1	2	3	4	5	Priemer
Senzitivita	0,729	0,649	0,698	0,757	0,773	0,721
PPH	0,642	0,627	0,678	0,697	0,711	0,683
Diceov koeficient	0,775	0,708	0,781	0,790	0,811	0,773

6.5 Zhodnotenie účinnosti a využiteľnosti aplikovaného riešenia

Navrhnutý algoritmus pre detekciu patologických útvarov bol testovaný na väčšom množstve snímok. Tieto snímky mali rôzne zastúpenie farieb, jasú, kontrastu. V niektorých z nich sa patologické útvary nachádzali, v iných nie. Úlohou navrhnutého algoritmu bolo všetky prítomné aspekty zohľadniť a dosiahnuť čo najlepšie výsledky detekcie.

Každý z útvarov prítomných v snímkoch sietnice predstavoval inú náročnosť detekcie, čo bolo podmienené jeho charakteristickou farbou, kontrastom či tvarom.

Na základe získaných hodnôt je možné skonštatovať, že spomedzi všetkých útvarov dosiahol najlepších výsledkov optický disk, ktorého úspešnosť bola zaznamenaná na hodnote 91,6 %. Úspešnosť dosiahnutej lokalizácie krvného riečiska a detekcie patológií bola zaznamenná na hodnotách o čosi nižších. U krvného riečiska to bola percentuálna úspešnosť 73,4 %, u exudátov 80 % a u mikroaneurizmov 77,3 %. Za dôvod nižšej úspešnosti môže byť považovaný aj fakt, že pri testovaní ciev a patológií boli použité objektívnejšie metódy (DSC, PPH, Senzitivita) na rozdiel od optického disku, kde bola úspešnosť vyhodnotená subjektívne.

Takto vytvorený algoritmus by mohol nájsť svoje uplatnenie v ordinácií oftalmológa, kde by bol považovaný za pomocný prvok pri diagnostike ochorenia diabetická retinopatia. Aj keď nie je úspešnosť maximálna, takto vytvorený algoritmus dokáže detekovať väčšie množstvo prítomných útvarov, čo je postačujúce pre samotnú diagnostiku ochorenia.

Záver

Cielom bakalárskej práce bolo vytvoriť program na automatickú detekciu útvarov spojených s ochorením diabetes mellitus na sietnici ľudského oka.

Táto práca poskytuje teoretický základ anatómie ľudského oka, patológií postihujúcich oko, ich prejavov a v neposlednom rade spôsobov spracovania obrazu. Na základe nadobudnutých poznatkov bol navrhnutý algoritmus pre detekciu patologických útvarov v prostredí Matlab.

Navrhnutý algoritmus je zložený z niekoľkých častí. K detekcií hľadaných útvarov bolo potrebné predom lokalizovať niekoľko súčastí sietnice, ktoré predstavovali problém pri samotnej detekcií patológií. Algoritmus preto začína lokalizáciou optického disku, pokračuje segmentáciou krvného riečiska a nakoniec prichádza k samotnej detekcií patologických útvarov - exudátov a mikroaneurizmov.

Testovanie navrhnutého algoritmu prebiehalo na snímkoch z dostupnej databázy, ktorá obsahovala 250 farebných snímok získaných prostredníctvom fundus kamery. Úspešnosť lokalizácie optického disku bola hodnotená vizuálne, úspešnosť segmentácie krvného riečiska a patologických útvarov bola hodnotená kvantitatívne použitím manuálne vytvorenej masky. U optického disku bola dosiahnutá úspešnosť na úrovni 91,6 %, u krvného riečiska 73,4 %, pri detekcií exudátov 80 % a u mikroaneurizmov bola dosiahnutá úspešnosť na úrovni 77,3 %. Na základe získaných percentuálnych hodnôt úspešnosti je možné skonštatovať, že algoritmus by bolo možné vylepšiť presnejšou detekciou krvného riečiska a tiež vylepšením detekcie mikroaneurizmov. Pri detekcií mikroaneurizmov často dochádzalo k ich zámene za oblasť ciev a to z dôvodu vzniku týchto patológií v bezprostrednej blízkosti krvného riečiska.

Takto navrhnutý program môže byť potenciálne využitý v ordinácií oftalmológa, kde môže slúžiť ako podporný software pri detekcií patologických útvarov v súvislosti s diabetickou retinopatiou a tým uľahčiť prácu lekára a napomôcť včasnej diagnostike, ktorá môže byť kľúčová.

Literatúra

- [1] ADJEROH, Don, M. C. LEE, N. BANDA a Uma KANDASWAMY. Adaptive Edge-Oriented Shot Boundary Detection. *EURASIP Journal on Image and Video Processing* [online]. 2009, **2009**, 1-13 [cit. 2020-06-04]. DOI: 10.1155/2009/859371. ISSN 1687-5176. Dostupné z: <http://jivp.eurasipjournals.com/content/2009/1/859371>
- [2] ACHARYA, Tinku a Ajoy K. RAY. *Image processing: principles and applications*. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2005. ISBN 04-717-1998-6.
- [3] Anatomia oka. In: *Bolest očí* [online]. [cit. 2019-12-26]. Dostupné z: <http://www.bolest-oci.eu/anatomia-oka/>
- [4] *Automated Detection of Diabetic Retinopathy Using Fundus Image Analysis* [online]. 2012, (3) [cit. 2019-12-28]. ISSN 0975-9646. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/e59a/1745547908b42bbe4d14ee8eae16eca47c1a.pdf>
- [5] BIRKFELLNER, Wolfgang. *Applied medical image processing: a basic course*. Second edition. Boca Raton: Taylor Francis, [2014]. ISBN 978-1-4665-5557-0.
- [6] Čo je hypertenzná retinopatia a aké sú príznaky. *AHealthPortal* [online]. 2018 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://sk.ahealthportal.com/20360-what-is-hypertensive-retinopathy-and-what-are-the-symptoms>
- [7] DEMIGNY, D., F.G. LORCA a L. KESSAL. Evaluation of edge detectors performances with a discrete expression of Canny's criteria. *Proceedings., International Conference on Image Processing* [online]. IEEE Comput. Soc. Press, 1995, , 169-172 [cit. 2020-03-27]. DOI: 10.1109/ICIP.1995.537441. ISBN 0-7803-3122-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/537441/>
- [8] *Diabetes mellitus z pohľadu oftalmológa: Moderný časopis pre lekárov prvého kontaktu* [online]. 2008, **5**(07-08) [cit. 2019-12-27]. ISSN 1336-4790.
- [9] Diabetická makulopatie, najčastejší príčina slepoty v produktívnom veku. *Trendy zdraví* [online]. 2015 [cit. 2019-12-27]. Dostupné z: <http://trendyzdravi.cz/medicina/diabeticka-makulopatie-nejcastejsi-pricina-slepoty-v-produktivnim-veku.html>
- [10] *Diabetická retinopatie* [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-12-27]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1411/jaro2016/VLOL7X1/um/Diabeticka_retinopatie_2014_Bohunice.pdf

- [11] E UMBAUGH, Scott. *Digital Image Processing and Analysis with MATLAB and CVIPtools: Third Edition* [online]. [cit. 2020-03-24]. ISBN 9781498766074.
- [12] HLAVÁČ, Václav a Miloš SEDLÁČEK. *Zpracování signálů a obrazů*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3110-1.
- [13] HLOŽÁNEK, Martin a Blanka BRŮNOVÁ. *Přístrojová technika v oftalmologii*. Praha: Univerzita Karlova, 2. lékařská fakulta, 2006. ISBN 80-902-1609-9.
- [14] HYCL, Josef a Lucie TRYBUČKOVÁ. *Atlas oftalmologie*. 2. vyd. V Praze: Triton, 2008. ISBN 978-80-7387-160-4.
- [15] CHAUBEY, Ashutosh Kumar. Comparison of The Local and Global Thresholding Methods in Image Segmentation. *World Journal of Research and Review*. 2016, (1), 1-4. ISSN 2455-3956.
- [16] JADWIGA, Rogowska. DIGITAL IMAGE PROCESSING TECHNIQUES FOR SPECKLE REDUCTION, ENHANCEMENT, AND SEGMENTATION OF OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY (OCT) IMAGES. *Optical Coherence Tomography* [online]. Elsevier, 2006, 2006, , 305-329a [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1016/B978-012133570-0/50013-5. ISBN 9780121335700. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780121335700500135>
- [17] JAN, Jiri. *Medical image processing, reconstruction, and restoration: concepts and methods*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. ISBN 08-247-5849-8.
- [18] Klinická biochemie a metabolismus. *Klinická biochemie a metabolismus*. 2012, **20**, 44-45. ISSN 1210-7921.
- [19] KOLÍN, Jan. *Oční lékařství*. 2., přeprac. vyd. Praha: Karolinum, 2007. ISBN 978-80-246-1325-3.
- [20] KRIŠKA, Jozef. *Hierarchická a nehierarchická zhuková analýza* [online]. In: . Bratislava: Slovenská technická univerzita [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: http://www2.fiit.stuba.sk/~kapustik/ZS/C-lanky0607/kriska/index.html#_Pou%C5%BEit%C3%A1_literat%C3%BAra
- [21] KVAPILÍKOVÁ, Květa. *Přehled chorob zraťového ústrojí*. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2003. ISBN 80-701-3380-5.
- [22] NG, H.P., S.H. ONG, K.W.C. FOONG, P.S. GOH a W.L. NOWINSKI. Medical Image Segmentation Using K-Means Clustering and Improved Watershed Algorithm. *2006 IEEE Southwest Symposium on Image*

- Analysis and Interpretation* [online]. IEEE, 2006, , 61-65 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.1109/SSIAI.2006.1633722. ISBN 1-4244-0069-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1633722/>
- [23] PAŠTA, Jiří. *Základy očního lékařství*. Praha: Univerzita Karlova, Nakladatelství Karolinum, 2017. ISBN 978-80-246-2460-0.
- [24] PARIKH, Rajul, Annie MATHAI, Shefali PARIKH, G CHANDRA SEKHAR a Ravi THOMAS. Understanding and using sensitivity, specificity and predictive values. *Indian Journal of Ophthalmology* [online]. 2008, **56**(1) [cit. 2020-06-04]. DOI: 10.4103/0301-4738.37595. ISSN 0301-4738. Dostupné z: <http://www.ijo.in/text.asp?2008/56/1/45/37595>
- [25] *Pokročilé spracovanie obrazu* [online]. 2016 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: https://dai.fmph.uniba.sk/upload/b/bb/PSO_CV04.pdf
- [26] ŘEHÁK, Jiří a Matúš REHÁK. *Venózní okluze sítnice*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3480-4.
- [27] ROSENFELD, Azriel. *Multiresolution image processing and analysis*. New York: Springer-Verlag, 1984. ISBN 03-871-3006-3.
- [28] RUSS, John C. *The image processing handbook* [online]. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999 [cit. 2020-01-01]. ISBN 08-493-2532-3.
- [29] SCANLON, Peter H. *A practical manual of diabetic retinopathy management*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2009. ISBN 978-1-405-17035-2.
- [30] SEAL, Arindrajit, Arunava DAS a Prasad SEN. Watershed: An Image Segmentation Approach. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2015, , 2295-2297. ISSN 0975-9646.
- [31] SHAHIN, Eman M., Taha E. TAHA, W. AL-NUAIMY, S. EL RABAIE, Osama F. ZAHRAN a Fathi E. Abd EL-SAMIE. Automated detection of diabetic retinopathy in blurred digital fundus images. *2012 8th International Computer Engineering Conference (ICENCO)* [online]. IEEE, 2012, 2012, , 20-25 [cit. 2019-12-28]. DOI: 10.1109/ICENCO.2012.6487084. ISBN 978-1-4673-5566-7. ISSN 978-1-4673-5566-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6487084/>
- [32] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. Praha: Grada, 2004. ISBN 80-247-0786-1.
- [33] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.

- [34] WALEK, Petr, Martin LAMOŠ a Jiří JAN. *Analýza biomedicínských obrazů: Počítačová cvičení*. 2. Brno, 2015. ISBN 978-80-214-4792-9.
- [35] ZHOU, Huiyu, Jiahua WU a Jianguo ZHANG. *Digital Image Processing*. 2. Ventus Publishing, 2010. ISBN 978-87-7681-542-4.
- [36] ZOU, Kelly H., Simon K. WARFIELD, Aditya BHARATHA, et al. Statistical validation of image segmentation quality based on a spatial overlap index1. *Academic Radiology* [online]. 2004, **11**(2), 178-189 [cit. 2020-06-04]. DOI: 10.1016/S1076-6332(03)00671-8. ISSN 10766332. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1076633203006718>

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

CLAHE	Adaptívna ekvalizácia histogramu s obmedzením kontrastu
DR	Diabetická retinopatia
DSC	Diceov koeficient podobnosti
e	Eulerovo číslo
FN	False negative - falošne nedetekované
FP	False positive - falošne detekované
G	Veľkosť gradientu
IRMA	Intraretinálne mikrovaskulárne abnormality
NPDR	Neprolieratívna diabetická retinopatia
PDR	Proliferatívna diabetická retinopatia
PPH	Pozitívna prediktívna hodnota
ROI	Región záujmu
T	Prahová hodnota
TP	True positive - správne detekované
VPDM	Vekom podmienená degenerácia makuly
σ^2	Smerodatná odchýlka

A Obsah príloh

Priložené súbory k tejto práci:

Klaudia_Mesikova_BP_priloha.zip

- zdrojové kódy
- **originalSnimky** - priečinok obsahujúci snímky na testovanie
- **manualneSnimky** - priečinok manuálne vytvorených snímok na kvantitatívny výpočet